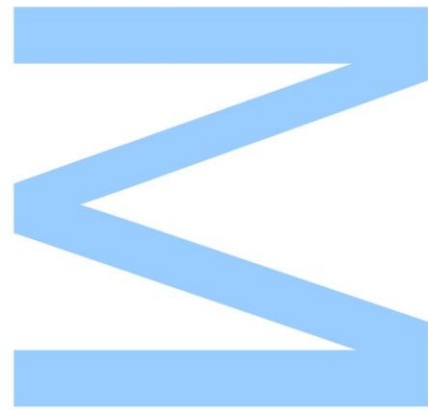




Estudo morfométrico e hidrogeoquímico de lagoas da Serra da Estrela



Marina de Sousa Paiva

Mestrado em Geologia

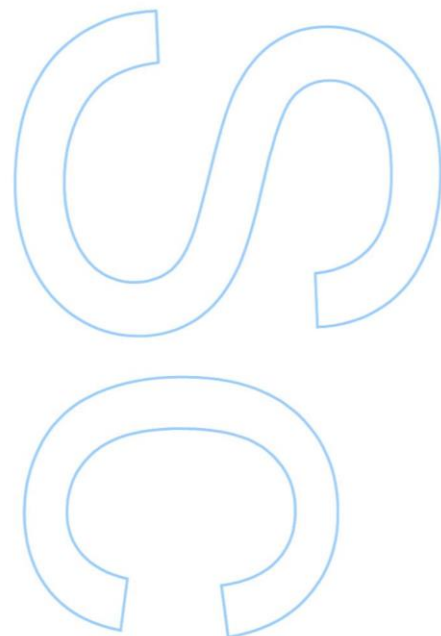
Departamento de Geociências, Ambiente e Ordenamento do Território
2016

Orientador

Doutor Jorge Manuel Espinha Marques, Professor Auxiliar
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Coorientador

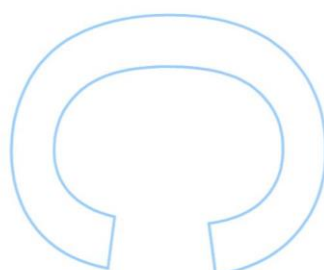
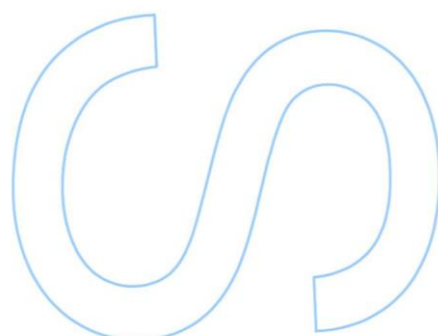
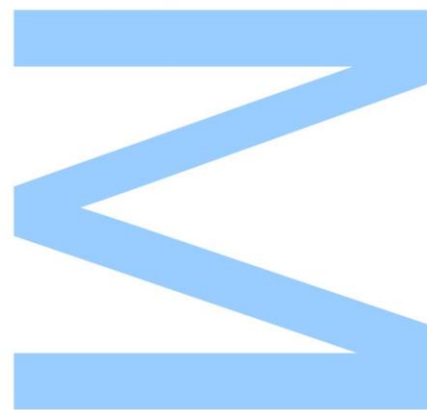
Doutora Catarina Mansilha, Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge
Laboratório de Química e Toxicologia, Unidade de Água e Solo





Todas as correções determinadas
pelo júri, e só essas, foram efetuadas.
O Presidente do Júri,

Porto, ____/____/____



AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação de mestrado tornou-se possível graças ao suporte e apoio de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de deixar o meu sincero e profundo agradecimento.

Ao *Professor Doutor Jorge Espinha Marques*, meu orientador, quero deixar um agradecimento especial por toda a orientação, apoio e incentivo durante a concretização deste estudo. Fico eternamente grata pela disponibilidade, pelas opiniões, críticas e sugestões, pela exigência de rigor e paciência para que este trabalho chegasse a bom termo. Obrigada pela partilha do saber e pelas valiosas contribuições para a concretização da dissertação.

À *Doutora Catarina Mansilha*, minha coorientadora agradeço a total disponibilidade e apoio dado. O meu profundo agradecimento pelo profissionalismo, opiniões, entusiasmo e colaboração na análise dos resultados relativos às análises químicas. Obrigada por toda a amabilidade e boa disposição com que sempre me recebeu nas idas ao Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, no Porto, a quem quero também agradecer toda a disponibilidade e apoio para a elaboração desta dissertação.

Ao *Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF)*, pelo apoio prestado à realização do trabalho de campo no Parque Natural da Serra da Estrela.

Aos *Meus Amigos da Faculdade* e aos *Meus amigos Vale-Cambrenses* muito obrigada pelas partilhas de conhecimento, pelas conversas sobre os mais variados assuntos, pelos momentos de descontração e pelas vivências que também foram necessárias e que contribuíram de alguma forma para a realização desta dissertação.

A todos os que me deram um pouco do seu tempo ao participar neste estudo, direta ou indiretamente e a quem por lapso não mencionei, peço desculpa e deixo o mais profundo agradecimento.

Aos meus *Pais, Irmãos e Avós*, um agradecimento profundo e especial pela compreensão, apoio e presença em todos os momentos. Obrigada por sempre acreditarem em mim e me proporcionarem a realização de mais uma etapa da minha formação académica; obrigada pelo encorajamento que sempre deram para a elaboração desta dissertação; obrigada pelos ensinamentos de vida, dedicação, carinho e amor que em todas as alturas transmitiram. A eles dedico todo este trabalho!

RESUMO

As regiões de montanha têm vindo a ser reconhecidas como fonte de recursos hídricos de elevada qualidade e em quantidade apreciável. É necessário, portanto, haver uma gestão sustentável destas regiões a fim de manter o abastecimento de água, a um elevado número de populações em todo o mundo.

A região da Serra da Estrela é fonte de recursos hídricos de elevada importância para Portugal. Na região mais elevada, particularmente acima dos 1400 m de altitude, é frequente o uso de sais para promover o degelo das estradas, que vão afetar tanto a água superficial como a água subterrânea, tornando-se numa grande preocupação ambiental, que deve ser investigada.

Na presente dissertação, a região da Serra da Estrela foi alvo de um estudo com o objetivo de contribuir para o conhecimento da morfologia e da hidrologia (com destaque para a hidrogeoquímica) das lagoas situadas acima de 1500 m de altitude. Os trabalhos de investigação abrangeram, ainda, as alterações hidroquímicas motivadas pela aplicação de sais na limpeza da neve nas estradas da montanha.

O estudo compreendeu estudos de gabinete, trabalho de campo (com realização de três campanhas de amostragem de água de sete lagoas) e análises químicas relativas, principalmente, aos iões maiores das águas.

Numa primeira fase de estudo foi realizado um inventário dos pontos de água, durante o qual foram observadas diversas características morfométricas. O estudo dessas características e da caracterização hidrológica de cada lagoa, levou à elaboração de três tipos de modelos hidrológicos conceptuais, com base na presença ou ausência de rede de drenagem superficial e na relação entre a lagoa e o aquífero livre.

O estudo hidrogeoquímico permitiu verificar que duas das lagoas estudadas (L3 e L6) se encontram contaminadas pelos sais promotores do degelo das rodovias. Os elevados valores de condutividade elétrica, a elevada mineralização e a *fácies* hidrogeoquímica das lagoas classificada como cloretada-sódica, indicam a contaminação das lagoas, principalmente, por NaCl e, em menor medida, por CaCl₂. Os modelos hidrológicos conceptuais, suportados pelos resultados hidrogeoquímicos, confirmam a contaminação das lagoas L3 e L6.

PALAVRAS-CHAVE: hidrologia de áreas montanhosas; morfometria de lagoas; hidrogeoquímica; contaminação da água.

ABSTRACT

Mountain areas have been recognized as a source of water resources of high quality and in appreciable quantity. The sustainable management of such regions is necessary in order to maintain the water supply for a large number of populations all over the world.

The Serra da Estrela region is the origin of water resources of great importance to Portugal. In the highest part of the mountain, particularly above 1400 m altitude, the use of road de-icing salts is often used, which will affect both surface water and groundwater, becoming a major environmental concern which should be investigated.

In the present dissertation, the region of Serra da Estrela was the subject of a study, with the objective to contributing to the knowledge of morphology and hydrology (with emphasis on hydrogeochemistry) of ponds located above 1500 m altitude. The research also covered the hydrochemical changes motivated by the application of road de-icing salts.

The study involved desk studies, field work (with three water sampling campaigns from seven ponds) and chemical analyses related to the higher water ions.

In a first phase of the study an inventory of the water points was carried out, during which several morphometric characteristics were observed. The study of these characteristics and the hydrological characterization of each pond, led to the elaboration of three types of conceptual hydrological models, based on the presence or absence of a surface drainage network and on the relationship between these ponds and the water table aquifer.

The hydrogeochemical study allowed to verify that two of the studied ponds (L3 and L6) are contaminated by the road de-icing salts. The high values of electrical conductivity, the high mineralization and the ponds hydrogeochemical *facies* classified as chlorate-sodium, indicate the ponds contamination, mainly by NaCl and, to a lesser extent, by CaCl₂. The conceptual hydrological models, supported by hydrogeochemical results, confirm the contamination of ponds L3 and L6.

KEY-WORDS: hydrology of mountain areas; ponds morphometry; hydrogeochemistry; water pollution.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Localização geográfica	3
1.2. Metodologias e técnicas.....	5
2. Conceitos Fundamentais	11
2.1. Água das áreas terrestres	11
2.2. A importância dos lagos.....	11
2.3. Origem e diversidade dos lagos.....	13
2.3.1. Bacias Tectónicas.....	13
2.3.2. Lagos associados à atividade vulcânica	14
2.3.3. Lagos formados por deslizamentos	14
2.3.4. Lagos de dissolução	14
2.3.5. Bacias lacustres de origem fluvial	14
2.3.6. Bacias lacustres formadas pelo vento.....	15
2.3.7. Bacias formadas pela atividade costeira	15
2.3.8. Bacias formadas pelo comportamento dos animais	15
2.3.9. Lagos formados pelo impacto de meteoritos.....	15
2.3.10. Lagos formados pela atividade dos glaciares.....	16
2.4. Morfometria dos lagos.....	18
2.4.1. Características morfométricas.....	18
2.4.1.1. Área.....	18
2.4.1.2. Volume	19
2.4.1.3. Desenvolvimento do volume.....	19
2.4.1.4. Profundidade máxima.....	20
2.4.1.5. Profundidade média	20
2.4.1.6. Profundidade relativa.....	20
2.4.1.7. Linha de costa	21
2.4.1.8. Desenvolvimento da linha de costa	21

2.4.1.9. Comprimento máximo	21
2.4.1.10. Largura máxima.....	22
3. Enquadramento geológico, geomorfológico e climatológico.....	25
4. Caracterização hidrológica das lagoas	37
4.1. Inventário de pontos de água.....	38
4.2. Estudo morfométrico das lagoas	41
Lagoa L1	41
Lagoa L2	44
Lagoa L3	46
Lagoa L4	49
Lagoa L5	51
Lagoa L6	53
Lagoa L7	56
4.3. Modelo hidrológico conceptual.....	59
5. Hidrogeoquímica.....	65
5.1 Hidrogeoquímica das águas das lagoas da Serra da Estrela	66
5.1.1. Parâmetros físico-químicos.....	67
5.1.2. <i>Fácies</i> Hidrogeoquímica	79
6. Considerações finais	85
7. Referências bibliográficas	87
Anexos	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Localização geográfica do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) e da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (BZMM) (Espinha Marques 2007).....	3
Figura 1.2 – Cartografia topográfica (na escala 1/25 000) e geológica (na escala 1/50 000) da região do Parque Natural da Serra da Estrela (adaptado de Ferreira & Vieira 1999).	4
Figura 1.3 – Medidor de pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), aparelho Hanna Instruments, modelo Combo.	6
Figura 1.4 – Frasco de amostragem para análise química.	6
Figura 1.5 – Diagrama de Piper mostrando como se obtém o ponto no losango (adaptado de Custodio & Llamas 2001).	8
Figura 1.6 – Tipos de águas deduzidas de um Diagrama de Piper (adaptado de Custodio & Llamas 2001).	8
Figura 1.7 – Diagrama de Durov (adaptado de Custodio & Llamas 2001).	9
Figura 1.8 – Diagrama de Stiff (adaptado de Fetter 2001).	9
Figura 2.1 – Exemplo de lagos de circo numa cordilheira montanhosa (Wetzel 1993).	17
Figura 2.2 – Esquema representativo da área de um lago circular (à esquerda) e de um lago irregular (à direita) e da linha de costa. No lago da esquerda o comprimento da linha de costa vai ter um valor inferior ao do lago da direita (adaptado de Florida Lakewatch 2001).	18
Figura 2.3 – Exemplo da medição do comprimento máximo (“maximum length”), da largura máxima (“maximum width”), da representação profundidade máxima (“maximum depth”) e da linha de costa (“lake shoreline”) de um lago (adaptado de Florida Lakewatch 2001).	22
Figura 3.1 – A Serra da Estrela na Península Ibérica e a localização da Cordilheira Central Ibérica (Espinha Marques 2007).	25
Figura 3.2 – Geologia da região da Serra da Estrela (extraído de Espinha Marques <i>et al.</i> 2013, base geológica revista de Oliveira <i>et al.</i> 1992).	26
Figura 3.3 – Bloco diagrama esquemático da geologia da Serra da Estrela (Ferreira & Vieira 1999).	27
Figura 3.4 – Modelo genético da Cordilheira Central (Ribeiro 1988).	28
Figura 3.5 – Principais estruturas tectónicas do Norte e Centro de Portugal (adaptado de Carvalho 2006).	29
Figura 3.6 – Morfologia da região da BZMM (Espinha Marques 2007).	30

Figura 3.7 – Unidades Hidrogeológicas da BZMM (Espinha Marques 2007).	32
Figura 3.8 – Unidades Hidrogeomorfológicas da BZMM: (1) Planalto Oriental; (2) Encostas Orientais; (3) Fundo de Vale (inferior); (4) Colo da Nave de Santo António; (5) Fundo de Vale (superior); (6) Encostas Ocidentais; (7) Encostas dos Cântaros; (8) Planalto Ocidental (inferior); (9) Planalto Ocidental (superior) (Espinha Marques <i>et al.</i> 2006).	33
Figura 3.9 – Aspeto da erosão glaciária numa área planáltica do maciço granítico (A); moreia lateral no vale de Alforfa (B) (Vieira 2008).	34
Figura 3.10 – Aspeto dos glaciares da Serra da Estrela obtido através de modelação matemática (Vieira 2008).	35
Figura 4.1 – Mapa da localização das lagoas estudadas (base cartográfica: Carta Militar nº 223 à escala 1/25 000).	37
Figura 4.2 – Geologia da região da região estudada (adaptado da Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela, à escala 1/75 000) (Ferreira & Silva 1999).	39
Figura 4.3 – Exemplo do modelo adotado do inventário de pontos de água.	40
Figura 4.4 – Mapa da lagoa L1 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	42
Figura 4.5 – Aspeto da Lagoa L1 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	43
Figura 4.6 – Mapa da lagoa L2 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	44
Figura 4.7 – Aspeto da lagoa L2 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	45
Figura 4.8 – Mapa da lagoa L3 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	46
Figura 4.9 – Representação da bacia hidrográfica da lagoa L3 na carta militar nº 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 (Torres 2015).	47
Figura 4.10 – Aspeto da lagoa L3 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	48
Figura 4.11 – Mapa da lagoa L4 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	49
Figura 4.12 – Aspeto da lagoa L4 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	50
Figura 4.13 – Mapa da lagoa L5 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	51

Figura 4.14 – Aspeto da lagoa L5 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	52
Figura 4.15 – Mapa da lagoa L6 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	53
Figura 4.16 – Representação da bacia hidrográfica da lagoa L6 na carta militar nº 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 (Torres 2015).	54
Figura 4.17 – Aspeto da lagoa L6 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	55
Figura 4.18 – Mapa da lagoa L7 com as medições realizadas através do <i>Google Earth Pro</i>	56
Figura 4.19 – Aspeto da lagoa L7 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).	57
Figura 4.20 – Modelo hidrológico conceptual tipo I e II, representando as lagoas L1, L2, L4, L5 e L7 em perspetiva cartográfica.	61
Figura 4.21 – Modelo hidrológico conceptual tipo III, representando as lagoas L3 e L6 em perspetiva cartográfica.	62
Figura 4.22 – Modelo hidrológico conceptual tipo I, representando as lagoas L1, L4, L5 e L7 em perspetiva de perfil.	62
Figura 4.23 – Modelo hidrológico conceptual tipo II, representando a lagoa L2, num corte esquemático segundo a linha de maior declive.	63
Figura 4.24 – Modelo hidrológico conceptual tipo III, representando as lagoas L3 e L6, num corte segundo AB.	64
Figura 5.1 – Medição <i>in situ</i> do pH, condutividade elétrica e temperatura da água na lagoa L1.	65
Figura 5.2 – Amostragem de água para análise química na lagoa L6.	65
Figura 5.3 – Medição do pH, condutividade elétrica e temperatura da água recolhida com auxílio do amostrador.	66
Figura 5.4 – Amostrador utilizado para recolha de água das lagoas.	66
Figura 5.5 – Evolução temporal da temperatura da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	67
Figura 5.6 – Evolução temporal do pH da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	68
Figura 5.7 – Evolução temporal da condutividade elétrica da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	68
Figura 5.8 – Evolução temporal do catião Na^+ da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	72

Figura 5.9 – Evolução temporal do anião Cl^- da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	72
Figura 5.10 – Evolução temporal do catião Ca^{2+} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	73
Figura 5.11 – Evolução temporal do catião Mg^{2+} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	73
Figura 5.12 – Evolução temporal do anião SO_4^{2-} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	74
Figura 5.13 – Evolução temporal do anião HCO_3^- da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	74
Figura 5.14 – Evolução temporal do catião K^+ da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.	75
Figura 5.15 – Teores médios dos iões Cl^- e Na^+ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.	76
Figura 5.16 – Teores médios dos iões Cl^- e Ca^{2+} para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.	77
Figura 5.17 – Teores médios dos catiões Ca^{2+} e Na^+ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.	77
Figura 5.18 – Teores médios dos iões SO_4^{2-} e Na^+ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.	78
Figura 5.19 – Teores médios dos iões Cl^- e SO_4^{2-} para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.	78
Figura 5.20 – Diagrama de Piper das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).	80
Figura 5.21 – Diagrama de Durov das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).	81
Figura 5.22 – Diagramas de Stiff das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).	82
Figura 5.23 – Mapa hidrogeoquímico das lagoas estudadas na Serra da Estrela (base do modelo digital do terreno com malha de 25 m retirada de SNIAmb-APA 2016).	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características morfométricas das lagoas estudadas.	58
Tabela 5.1 – Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica da água das lagoas, medidos <i>in situ</i>	67
Tabela 5.2 – Resultados dos teores dos iões maiores para as campanhas de janeiro, março e junho de 2016.	70
Tabela 5.3 – Média dos teores dos iões maioritários para as campanhas de janeiro, março e junho de 2016.	75
Tabela 5.4 – Matriz de correlações entre teores de iões maioritários.	76

LISTA DE ABREVIATURAS

BZMM – Bacia do Zêzere a montante de Manteigas.

PNSE – Parque Natural da Serra da Estrela.

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia.

ZCI – Zona Centro Ibérica.

CXG – Complexo Xisto-Grauváquico.

FGSL – Falha de Gouveia-Seia-Lousã.

FP – Falha de Pônsul.

ZFBVM – Zona de falha Bragança-Vilariça-Manteigas.

1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação versa sobre o estudo morfométrico, hidrológico e hidrogeoquímico de lagoas localizadas na Bacia do Zêzere a montante de Manteigas (BZMM) e na sua área envolvente, localizada no Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE), no Centro de Portugal.

A realização deste trabalho de cariz hidrológico é de elevado interesse pois a água é um constituinte fundamental para a vida e ainda um dos atuais problemas a considerar, devido à sua escassez em termos de qualidade.

A Humanidade sempre esteve dependente da água e o seu percurso histórico condicionado pela sua escassez ou abundância. Com o constante crescimento demográfico, industrialização e outras atividades económicas da população, os recursos hídricos ficam sujeitos a uma elevada pressão, colocando em risco a sua quantidade e qualidade (Cunha *et al.* 1980).

As regiões montanhosas são reconhecidas como áreas estratégicas do ponto de vista socioeconómico, dado serem fonte de recursos hídricos de excecional qualidade e em notável quantidade para a população mundial. A sua importância é reconhecida pela UNESCO no International Hydrological Programme (IHP), que reforça a necessidade de preservação daqueles recursos (Aureli 2002).

Embora as áreas de montanha ocupem uma parte considerável da superfície terrestre, os recursos hídricos e os sistemas de água subterrânea das regiões montanhosas são, em geral, insuficientemente compreendidos (Forster & Smith 1988).

Os recursos hídricos de montanha são indispensáveis para o abastecimento de água às populações, à agricultura e à indústria das áreas envolventes (Viviroli *et al.* 2010, Espinha Marques *et al.* 2011a, b), sendo que o seu papel como fonte e reservatório de água doce é um facto bem estabelecido (Bandyopadhyay 1995, Aureli 2002, Grunewald *et al.* 2007).

O problema da contaminação das águas tem sido considerado como uma das maiores questões ambientais, preocupando quer a comunidade científica quer as autoridades governamentais. Apesar de as áreas montanhosas estarem isoladas, elas mostram-se sensíveis a alterações climáticas e a influências antrópicas (Espinha Marques *et al.* 2013).

A utilização de sais, como o cloreto de sódio (NaCl) e o cloreto de cálcio (CaCl₂), na limpeza da neve e do gelo nas rodovias é uma prática comum em regiões afetadas pela queda de neve, o que, frequentemente, origina a contaminação dos recursos hídricos tanto superficiais como subterrâneos (EPA 2002, Espinha Marques *et al.* 2005).

A região abrangida por este estudo, em especial o cume do maciço montanhoso da Serra da Estrela, a Torre, é um dos mais importantes pontos turísticos de Portugal, com destaque para pistas de esqui aí localizadas, que atraem milhares de pessoas no inverno. Como o acesso à área mais elevada da montanha é feito exclusivamente através de uma rodovia há a necessidade de a manter transitável para os turistas, assim como para os habitantes locais que necessitam dela para atravessar a serra diariamente. Especialmente acima dos 1400 metros de altitude, o uso continuado de substâncias químicas destinadas a facilitar a fusão da neve e do gelo nas estradas, pode afetar a composição química das águas superficiais e subterrâneas (Espinha Marques *et al.* 2011b, Carreira *et al.* 2011), originando um problema ambiental que deve ser investigado.

Devido ao seu enquadramento geológico, geomorfológico e climático, a Serra da Estrela desempenha um importante papel no funcionamento do ciclo da água da região, e é fonte de recursos hídricos estratégicos de elevada qualidade para Portugal, não só para uso doméstico, mas também para a agricultura, para a indústria do engarrafamento e para o termalismo (Espinha Marques *et al.* 2009b). Sendo assim é importante apurar se a qualidade destes recursos se encontra ameaçada pela limpeza das rodovias através da aplicação dos referidos sais (NaCl e CaCl_2).

Os lagos e lagoas de montanha são exemplos de importantes reservatórios de água de altitudes elevadas, que apresentam diversidade morfológica e características próprias determinantes para a sua correta gestão. Essas características peculiares têm uma influência relevante para a qualidade das águas, tratando-se de reservatórios de grande importância (Tiberti *et al.* 2010).

Visto serem corpos de água vulneráveis, os lagos e lagoas de altitude são altamente condicionados por diversos fatores, quer de carácter natural, quer antrópico. São pois relevantes os estudos desses lagos e lagoas de montanha, uma vez que eles são particularmente bons indicadores de alterações ambientais, inclusivamente de alterações climáticas (Tiberti *et al.* 2010).

1.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

A área do presente estudo localiza-se na região Centro de Portugal, no maciço montanhoso da Serra da Estrela com latitude entre 40° 15'N e 40° 38'N e longitude entre 7° 18'W e 7° 47'W. Foi considerada a área correspondente à Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (BZMM) (Espinha Marques *et al.* 2005) e ainda a sua zona envolvente, que se integra na área protegida do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) (Fig. 1.1). Esta bacia de, aproximadamente, 28 Km², abrange altitudes entre os 875 metros de altitude na estação hidrométrica de Manteigas e os 1993 metros de altitude no lugar conhecido como Alto da Torre, o ponto mais elevado de Portugal Continental.

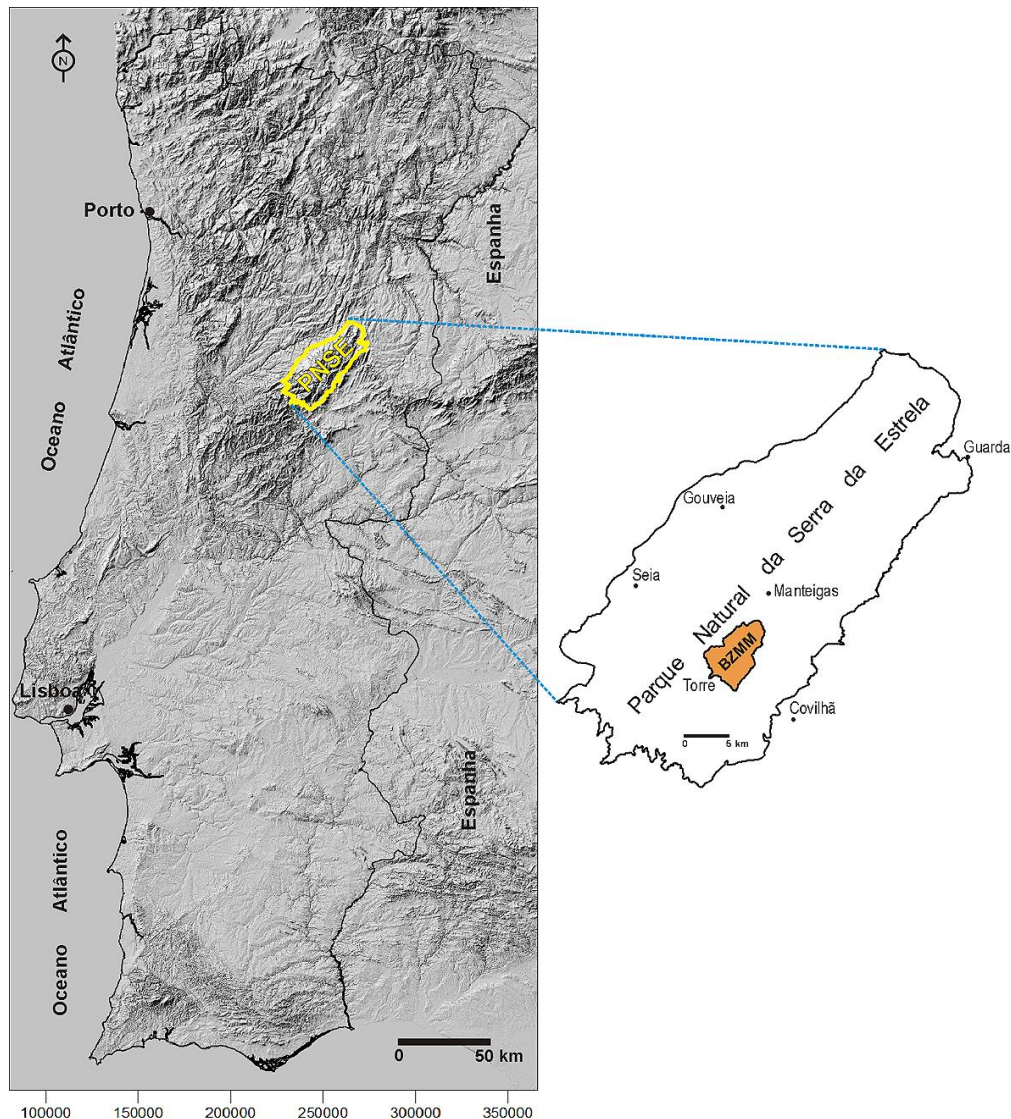


Figura 1.1 – Localização geográfica do Parque Natural da Serra da Estrela (PNSE) e da Bacia do Zêzere a Montante de Manteigas (BZMM) (Espinha Marques 2007).

A área do PNSE pertence aos concelhos de Manteigas, Covilhã e Seia e ao distrito da Guarda.

A cartografia topográfica do PNSE está presente nas folhas 212 (Seia), 213 (Manteigas), 223 (Loriga – Seia) e 224 (Teixoso – Covilhã) à escala 1/25 000 do Instituto Geográfico do Exército. A cartografia geológica está representada nas folhas 17-D, Gouveia (Teixeira *et al.* 1967) e 20-B Covilhã (Teixeira *et al.* 1974) (Fig. 1.2) da Carta Geológica de Portugal à escala 1/50 000 publicadas pelos Serviços Geológicos de Portugal, atual Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG).

Relativamente à localização da área de estudo (BZMM e a sua envolvente), esta está presente na carta topográfica 223 (Loriga – Seia) e na carta geológica 20-B Covilhã.

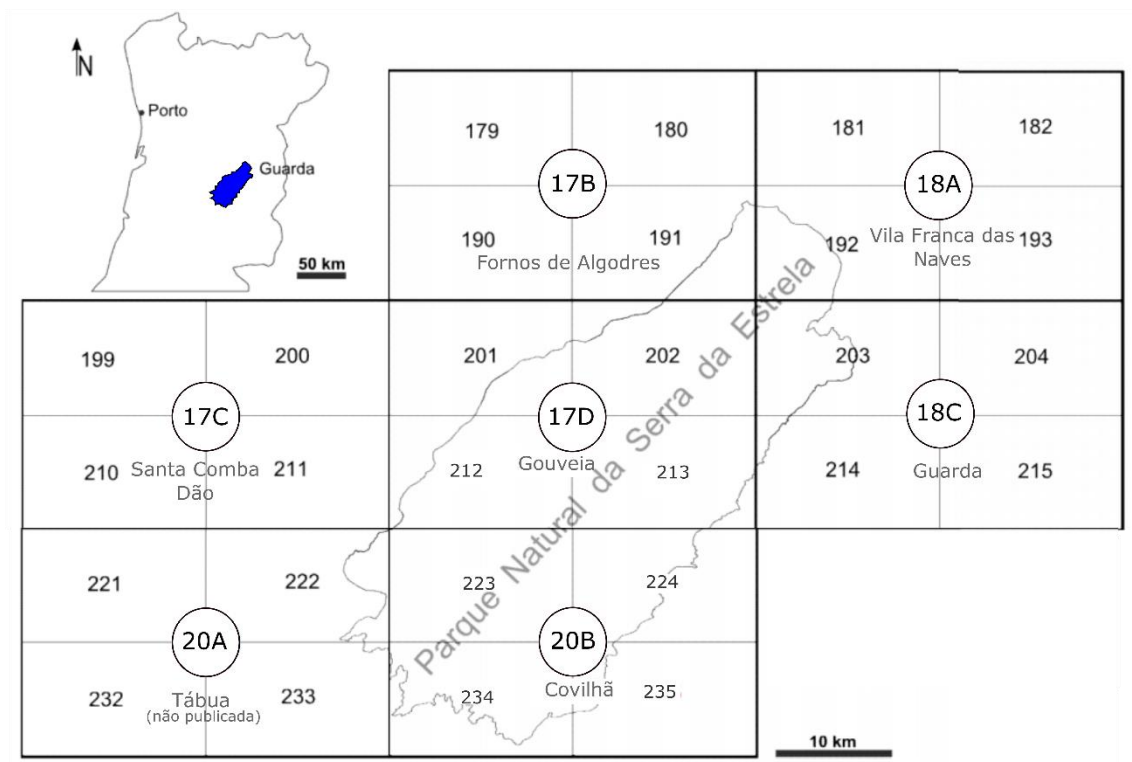


Figura 1.2 – Cartografia topográfica (na escala 1/25 000) e geológica (na escala 1/50 000) da região do Parque Natural da Serra da Estrela (adaptado de Ferreira & Vieira 1999).

1.2. METODOLOGIAS E TÉCNICAS

O ciclo hidrológico é composto por vários subsistemas interligados, nos quais entram vastos conjuntos de fenómenos de troca de matéria e energia, que vão refletir também a influência antrópica (Fetter 2001, Espinha Marques 2007). Assim sendo, o subsistema hidrogeológico não deve ser encarado como uma realidade isolada.

Na presente dissertação tomou-se uma abordagem multidisciplinar e interdisciplinar, recorrendo a diversos ramos das Ciências da Terra, como a Geologia, a Geomorfologia, a Climatologia, a Hidrologia, a Hidrogeologia e a Hidrogeoquímica.

Os trabalhos de investigação levados a cabo entre outubro de 2015 e setembro de 2016 compreenderam a realização de tarefas de campo, de gabinete e de laboratório:

- Reconhecimento de campo;
- Inventariação das lagoas;
- Realização da caracterização morfométrica de lagoas
- Caracterização hidrológica das lagoas;
- Realização de campanhas de amostragem da água das lagoas para o estudo hidrogeoquímico;
- Análise química das águas amostradas para determinação dos componentes maiores e menores;
- Avaliação do impacto das substâncias utilizadas na limpeza da neve das estradas;
- Elaboração de um modelo hidrológico conceptual das lagoas da Serra da Estrela.

A realização de um inventário dos pontos de amostragem é o ponto de partida para um estudo hidrológico, onde se define uma rede de monitorização, neste caso das águas superficiais (Custodio & Llamas 1996).

Para o estudo hidrogeológico das lagoas, a escolha das mesmas teve como critérios:

- Representarem lagoas de origem glacial, sem intervenção antrópica;
- Situares-se em cotas inferiores e superiores à rodovia para verificar o impacto da limpeza da neve das estradas.

Para cada lagoa foi preenchida uma ficha de caracterização (ver Anexo I) que inclui informação hidrológica e morfométrica – inventário de pontos de água. A monitorização foi realizada entre janeiro e junho de 2016. Em cada campanha foram medidos *in situ* o pH, a condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), usando um aparelho de

medição da marca Hanna Instruments, modelo Combo (Fig. 1.3). O valor de cada medição foi obtido após estabilização do aparelho.

A determinação dos teores de solutos dissolvidos foi feita em laboratório, tendo sido necessário recolher amostras de água. As análises foram realizadas num curto espaço de tempo a fim de reduzir ao mínimo possíveis alterações da composição química das águas.

Foram analisados os aniões cloreto (Cl^-), hidrogenocarbonato (HCO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) e os cátions sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+). Os resultados da composição química são normalmente apresentados em mg/L ou em equivalentes químicos a fim de facilitar eventuais cálculos analíticos e comparações entre águas distintas.

As análises químicas (iões maiores e menores) foram realizadas no Departamento de Saúde Ambiental – Unidade de Água e Solo, do Laboratório de Química e Toxicologia do Instituto Nacional de Saúde Doutor Ricardo Jorge, no Porto.



Figura 1.3 – Medidor de pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$), aparelho Hanna Instruments, modelo Combo.



Figura 1.4 – Frasco de amostragem para análise química.

A amostragem foi realizada em cada lagoa, tendo sido recolhido um litro de amostra num frasco de polietileno de alta densidade de tampa simples (Fig. 1.4), que foi mantido a baixas temperaturas até à sua análise. As técnicas analíticas utilizadas foram: cromatografia iónica para determinação dos teores de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- e SO_4^{2-} . O teor de HCO_3^- foi determinado pelo cálculo da alcalinidade. Os resultados relativos aos iões maioritários foram tratados graficamente com recurso ao programa RockWorks, tendo sido elaborados diagramas de Stiff, Piper e Durov.

Estes diagramas são um bom exemplo da aplicação visual dos dados:

- Diagrama de Piper: é um diagrama triangular, constituído por dois triângulos e um losango, em que os iões são projetados em percentagem de miliequivalentes por litro (% meq/L). As principais espécies iónicas presentes na maioria das águas são Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} . Um diagrama trilinear pode agrupar até três iões e, se se juntar os catiões Na^+ e K^+ , consegue-se ter dispostos os catiões num diagrama trilinear, ou seja num dos triângulos (o da direita) e os aniões no outro (o da esquerda) (Fig. 1.5). A partir da projeção dos dois pontos (o ponto dos catiões e o ponto dos aniões) obtém-se um terceiro ponto no losango, conseguindo-se assim a classificação das águas relativamente aos iões dominantes (Fig. 1.6) (Custodio & Llamas 2001)
- Diagrama de Durov: segue os mesmos padrões do diagrama de Piper, é constituído por dois triângulos, mas ao invés de apresentar um losango, apresenta um quadrado, onde são projetados os catiões e os aniões (Fig. 1.7). É mais utilizado pelos países de influência russa (Fetter 2001).
- Diagrama de Stiff: é uma forma de apresentação gráfica de análises químicas, em que os iões principais (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-}) são projetados em meq/L. Este diagrama consiste numa forma poligonal criada a partir de três eixos horizontais paralelos e igualmente espaçados entre si, divididos verticalmente por um outro eixo, representando-se do lado esquerdo os catiões e do lado direito os aniões (Fig. 1.8). É um diagrama muito útil para fazer uma rápida comparação visual entre águas de diferentes locais. Quanto maior for a área do polígono, maior a concentração dos vários iões (Custodio & Llamas 2001, Fetter 2001).

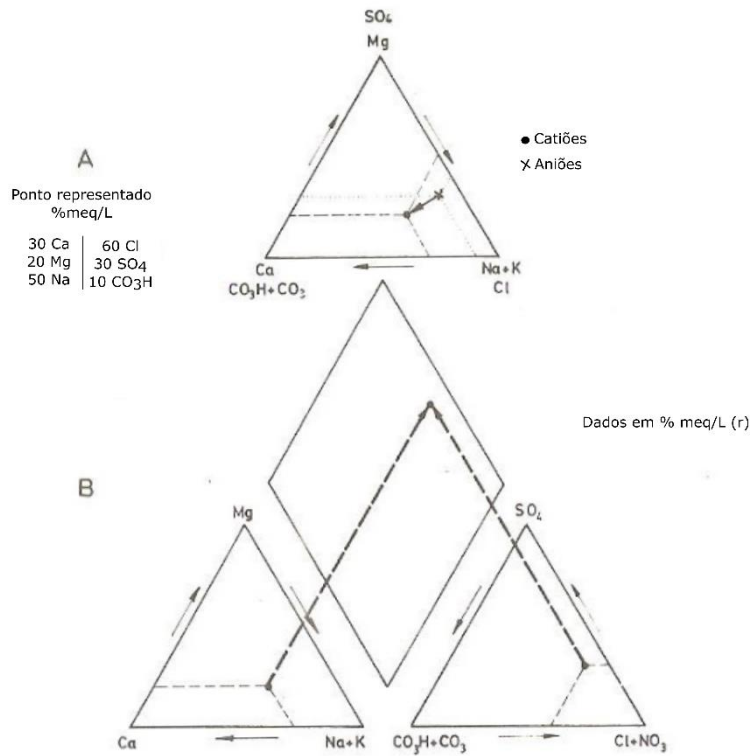


Figura 1.5 – Diagrama de Piper mostrando como se obtém o ponto no losango (adaptado de Custodio & Llamas 2001).

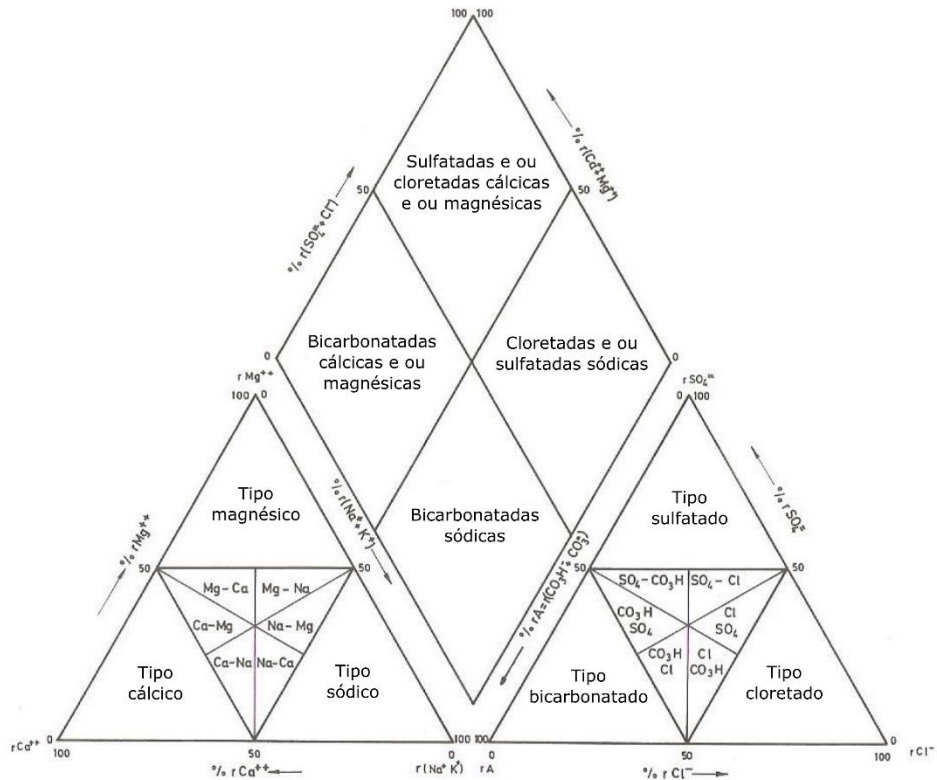


Figura 1.6 – Tipos de águas deduzidas de um Diagrama de Piper (adaptado de Custodio & Llamas 2001).

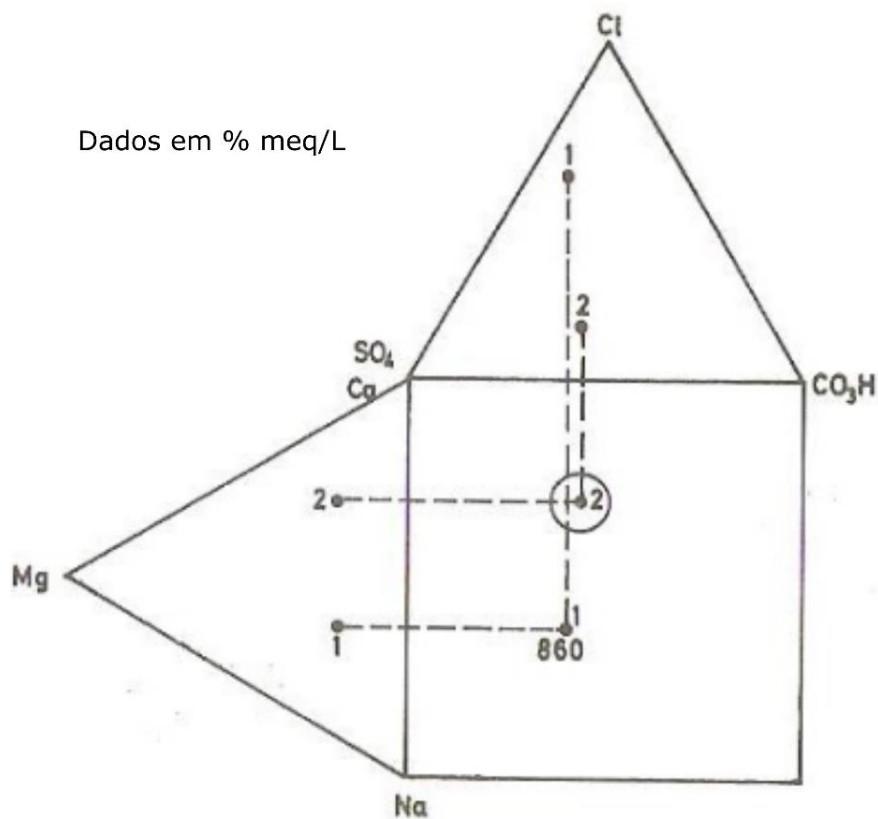


Figura 1.7 – Diagrama de Durov (adaptado de Custodio & Llamas 2001).

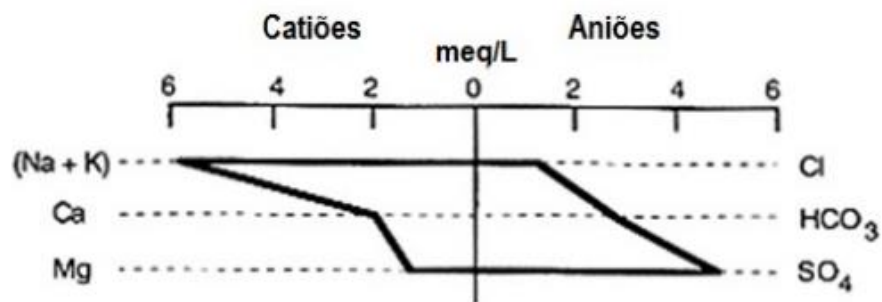


Figura 1.8 – Diagrama de Stiff (adaptado de Fetter 2001).

Os modelos hidrológicos conceituais são representações da realidade que facilitam a sua aplicabilidade. Podem ser traduzidos por ideias, palavras e valores numéricos. Na presente dissertação, a elaboração dos modelos hidrológicos conceituais foram elaborados através de ideias e palavras, que deram origem a representações esquemáticas.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1. ÁGUA DAS ÁREAS TERRESTRES

Segundo Welch (1952), nos continentes podem-se encontrar dois tipos de designação de ambientes que contêm água superficial, os lóticos – série das águas correntes, e os lênticos – série das águas paradas.

O primeiro ambiente é definido como incluindo todos os tipos de águas interiores em que toda a água se move continuamente e numa direção definida, como acontece nos ribeiros e rios, por exemplo.

Os ambientes lênticos incluem todas as formas de águas interiores, desde lagos, lagoas e pântanos, em que a água não tem nenhuma direção definida nem fluxo contínuo, embora possa haver uma pequena parte da água que se movimenta devido à ação de ondas, correntes internas ou algum tipo de escoamento na proximidade das entradas e saídas da água dos seus reservatórios (Welch 1952, Wetzel 1993).

Apesar de, à escala da vida humana, os lagos parecerem características permanentes da paisagem, sob o ponto de vista geológico eles são transitórios (Hutchinson 1957) e isso é possível ser observado quando os lagos são de pequenas dimensões, conseguindo-se então ver a passagem de um estágio de pântano a lagoa e deste a lago, mudança da série referida (pântano→lagoa→lago) (Welch 1952).

2.2. A IMPORTÂNCIA DOS LAGOS

Os termos “lago”, “lagoa” e “pântano” são muito usados na limnologia, descrevendo não só a sequência evolutiva, assim como exprimindo conjuntos de condições existentes nas águas paradas que diferem em alguns aspetos característicos uns dos outros.

A distinção entre lago (*lake*) e lagoa (*pond*) é associada muitas vezes à diferença entre a área e a profundidade, não existindo conceitos universalmente aceites, pois tudo se resume a uma questão de opinião (Welch 1952).

Desde há muito que esta distinção tem chamado a atenção dos cientistas, em particular, dos limnologistas, mas nunca havendo uma distinção definitiva e exata entre estes (Maine 2016, Mentalfloss 2016). No entanto, a comunidade científica partilha algumas ideias sobre lagos e lagoas, que passam pela área, profundidade e temperatura. No geral a distinção entre estes corpos de água assenta nos seguintes aspetos:

- relativamente à área, os lagos possuem uma superfície e área maior que as lagoas;
- os lagos possuem também uma maior profundidade, que leva a que nestes não haja penetração da luz solar, não sendo favorável ao desenvolvimento de plantas aquáticas, pois estas necessitam da luz solar para realizar a fotossíntese, tal como acontece nas lagoas;
- os lagos têm, tipicamente, temperaturas quentes e frias estratificadas nos meses de verão, enquanto que as lagoas apresentam temperatura consistente durante o mesmo período de tempo (Difference Between 2016, Maine 2016, Mentalfloss 2016).

Welch (1952) teve em conta a definição dada por Forel (1892 *in* Welch 1952), na qual os lagos são definidos como um corpo de água parada que ocupa uma bacia e não tem continuidade com o mar; as lagoas são lagos de pequena profundidade e os pântanos são lagoas de tal pequena profundidade que são ocupados por vegetação enraizada. Em última análise a definição de Forel, coloca todos os corpos de água parada ao abrigo do termo lago.

Existem muitas definições dos termos, mas nenhuma é tão satisfatória como a de Forel para fins limnológicos, nem nenhuma se mostra ideal. Assim, Welch (1952) considera lagoas como corpos pequenos e rasos em que poderá existir vegetação (plantas aquáticas superiores) sendo todos os restantes corpos de água maiores classificados como lagos.

Os lagos diferem entre si, na área, entre os que são pouco maiores que uma lagoa até aos de maior dimensão; quanto à profundidade eles variam bastante, nunca chegando, obviamente, à profundidade de um oceano. Relativamente à sua altitude são igualmente diversificados, estando regra geral sempre acima do nível do mar, mas havendo exceções. Deve-se também ter em conta, que ocorre variação da altitude da superfície de praticamente todos os lagos de estação para estação e de ano para ano (Welch 1952, Wetzel 1993).

Os lagos e lagoas têm uma grande importância pois a sua geomorfologia está relacionada às ocorrências de natureza física, química e biológica que sucedem nas bacias, tendo um papel relevante, no que respeita ao controlo do metabolismo do lago ou lagoa, considerando ainda as limitações climatológicas inerentes à localização dos mesmos, sendo também responsável pela drenagem e entrada de água nas bacias lacustres (Wetzel 1993).

Esses corpos de água estão expostos e interatuam com processos químicos e metabólicos do solo e dos sedimentos, sendo necessário ter em conta a morfologia da

bacia lacustre, pois esta vai ter um papel importante no controlo das características físicas, químicas e biológicas dos lagos e lagoas (Wetzel 1993). As características morfométricas permitem prever como as condições climáticas e a influência do homem poderão afetar as águas desses sistemas, perceber qual a melhor forma de os gerir, tendo assim um papel crítico na dinâmica de todo o sistema lacustre (Florida Lakewatch 2001).

É necessário expressar qualitativamente os aspetos das formas de um lago, das características morfométricas, de modo que sejam estabelecidos determinados índices e as comparações sejam feitas entre diferentes lagos (Hutchinson 1957, Welch 1952).

2.3. ORIGEM E DIVERSIDADE DOS LAGOS

Os lagos são formados de diversas formas, em função da sua localização geográfica, assim como dos fatores geológicos e biológicos que atuam. Uma parte teve a sua origem relacionada com eventos catastróficos, formando-se por processos vulcânicos, tectónicos e até mesmo pela queda de meteoritos (Florida Lakewatch 2001, Wetzel 1993), mas também os há formados por processos mais graduais como a atividade glaciária, mudanças no curso dos rios e processos de dissolução (Florida Lakewatch 2001).

Uma grande parte dos lagos profundos encontram-se sobretudo nas regiões montanhosas da Europa, parte ocidental da América do Norte e do Sul, nas zonas montanhosas da África central e da Ásia. Estes grandes lagos são um recurso importante de água doce, mas a maioria dos lagos são de muito mais pequena dimensão (Wetzel 1993).

Devido à ação glaciária do período mais recente, o avanço e recuo de gelos criou muitas depressões que seguidamente foram preenchidas por água, sofrendo modificações. Assim é possível encontrar-se um grande número de lagos no Hemisfério Norte, onde as massas continentais da América do Norte e Euro-Asiática sofreram o efeito do movimento dos glaciares (Wetzel 1993).

São muitas as origens das bacias dos lagos. Com base em Hutchinson (1957) é possível referir até onze possíveis origens, tendo como característica a depressão geomorfológica da bacia:

2.3.1. BACIAS TECTÓNICAS

Este tipo de bacias é originado por movimentos das zonas mais profundas da crosta terrestre, excetuando aquelas em que a manifestação de atividade vulcânica

desempenhou um papel importante. Resulta principalmente das depressões originadas pelas falhas (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

2.3.2. LAGOS ASSOCIADOS À ATIVIDADE VULCÂNICA

A atividade vulcânica origina bacias de lagos de modos diferentes: à medida que o material vulcânico é ejetado ou o magma libertado, pode ocorrer a formação de depressões e cavidades, que se não tiverem drenagem dão origem a lagos; pode ainda haver acumulação de água nos picos vulcânicos, formando lagos de cratera e ainda as bacias formadas pela queda do teto de uma câmara magmática parcialmente vazia, dando origem às caldeiras. Pode-se ter também a combinação de processos tectónicos e vulcânicos na origem de lagos, por exemplo a derrocada de uma caldeira ao longo de fraturas de falhas pré-existentes (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

2.3.3. LAGOS FORMADOS POR DESLIZAMENTOS

A queda de grandes quantidades de material não consolidado (queda de rochas, rios de lama, avalanches de gelo, etc.) pode desabar para dentro de vales dos rios, provocando diques dando assim origem a lagos. Os lagos que se vão formar atrás dos diques são normalmente temporários (de semanas a meses), pois a erosão rápida por parte do efluente vai fazer com que haja drenagem da água entretanto retida (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

2.3.4. LAGOS DE DISSOLUÇÃO

Lagos localizados em depósitos de rochas solúveis, que se vão dissolvendo à medida que a água os atravessa. Formados em rochas calcárias (carbonato de cálcio, CaCO_3), pois estas são suscetíveis à dissolução devido à sua composição (sais como o cloreto de sódio (NaCl), sulfato de cálcio (CaSO_4), etc.) e quando combinadas com águas ligeiramente acidificadas pela presença de dióxido de carbono (CO_2) em solução, vindo da atmosfera ou até mesmo do solo. As bacias de dissolução geralmente arredondadas chamam-se dolinas. A dissolução do calcário é também frequente em grutas, e ao enfraquecer o teto das estruturas abate formando uma dolina aproximadamente cónica. Estas depressões estão quase sempre cheias de água e podem prolongar-se até ao aquífero (Hutchinson 1957, Florida Lakewatch 2001, Wetzel 1993).

2.3.5. BACIAS LACUSTRES DE ORIGEM FLUVIAL

As águas dos rios são bastante erosivas e podem fazer com que apareçam bacias de lagos ao longo do seu percurso. A montante do rio, podem ocorrer bacias rochosas

devido ao declive ser mais pronunciado, e que podem perdurar mesmo após o curso do rio ser desviado. Existem também os lagos formados no sopé das quedas de água e os lagos formados ao longo dos rios devido ao assoreamento transversal causado pela deposição de sedimentos do curso principal (lagos laterais). Os lagos que se formam nos deltas dos rios são formados devido à redução da velocidade da corrente que vai acumular os sedimentos fazendo com que a água circule em seu redor segundo um padrão em forma de U. Estes lagos estão sujeitos às forças das marés recebendo com frequência água salgada e são muitas vezes salobros (lagos de delta). Existem também os lagos de meandro, que se formam nas partes côncavas das curvas do rio que atravessa e ultrapassa as irregularidades topográficas (Wetzel 1993).

2.3.6. BACIAS LACUSTRES FORMADAS PELO VENTO

O efeito do vento na distribuição da areia de rochas fragmentadas tem como formação total ou parcial de lagos em sistemas dunares. Por vezes a água que contém é temporária e depende das flutuações climáticas, sendo lagos extremamente transitórios. As bacias ficam preenchidas pelas águas nos períodos húmidos do ano e posteriormente vão-se tornando cada vez mais ricas em sais à medida que a evaporação aumenta (Wetzel 1993).

2.3.7. BACIAS FORMADAS PELA ATIVIDADE COSTEIRA

Os lagos associados às linhas de costa normalmente têm a sua origem ligada a alguma irregularidade ou recuo da linha de costa. A corrente marítima pode encontrar uma baía e depositar sobre ela os sedimentos formando uma barra de um lado ao outro, separando a baía do mar, formando um lago costeiro (Wetzel 1993).

2.3.8. BACIAS FORMADAS PELO COMPORTAMENTO DOS ANIMAIS

Tanto o homem como os castores são capazes de construir barragens e represas através de vales que inundam áreas previamente secas, formando lagos. Os sedimentos que se vão acumulando contra os diques feitos pelo castor americano provocam por vezes lagos grandes e duradouros. Estes lagos são geralmente pouco profundos (Florida Lakewatch 2001, Wetzel 1993).

2.3.9. LAGOS FORMADOS PELO IMPACTO DE METEORITOS

É um fenómeno raro e o mais catastrófico da formação de um lago. A queda de um meteorito vai formar uma cratera na superfície que mais tarde pode ser preenchida com água (Hutchinson 1957).

2.3.10. LAGOS FORMADOS PELA ATIVIDADE DOS GLACIARES

A atividade dos glaciares é de todos os agentes que levam à formação de lagos, a mais importante. Durante a maior parte da história da Terra supõe-se que sempre tenham existido bacias de lagos devido à atividade vulcânica, tectónica, de dissolução, alguns lagos formados pela ação dos ventos, entre outros mas, de facto, o número de pequenos lagos provocados pela ação glacial é muito significativo (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

O facto de a maior parte dos lagos resultantes desta atividade se encontrar no Hemisfério Norte deve-se à grande glaciação que ocorreu no Pleistocénico, em que as massas de gelo avançavam e recuavam.

A formação das bacias lacustres difere entre si pela sua localização, pois as que se formam no topo das montanhas vão ser diferentes das que se formam em relevos mais suaves.

Pode-se ter lagos que se formam temporariamente à superfície, dentro ou por baixo das massas de gelo atuais, nas zonas onde ocorre degelo transitório (Welch 1952, Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

Outra situação que leva à formação dos lagos num ambiente de montanha, são as frentes do glaciar, assim como as suas moreias terminais que funcionam como diques que levam a água da fusão dos glaciares aos vales dos rios formados precisamente por essa ação.

A erosão do gelo provoca então muitos lagos, que se formam devido ao movimento do gelo sobre as superfícies de rocha consolidada, provocando a remoção de material solto ao longo de fraturas, especialmente nas regiões de elevada altitude. Assim que o glaciar recua, as bacias formadas na rocha vão posteriormente ser preenchidas pelas águas da fusão do gelo (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

Por vezes, a parte superior dos vales glaciários adquire a forma de anfiteatro devido à contínua ação de congelamento e fusão de gelos, designando-se os lagos formados na estrutura do anfiteatro (circo) por lagos de circo. A água acumula-se devido à existência de depósitos de moreia ou pelo facto de haver uma saliência de rocha mais elevada que a depressão (Fig. 2.1). Estes lagos de circo são, na sua maioria, pouco profundos e pequenos e podem ser encontrados dispostos sequencialmente ao longo de um vale de montanha, tendo um lago mais elevado acima do que lhe segue, dando a ideia de degraus (Wetzel 1993).

Muitas das bacias de lagos formadas devem-se ao recuo das massas de gelo continental no fim do Pleistocénico. Ao recuar o glaciar deixava nas suas moreias laterais e terminais, o material que foi movimentando aquando do seu avanço anterior.

Esse material formou diques em vale e depressões que se formaram irregularmente, levando à formação de lagos (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

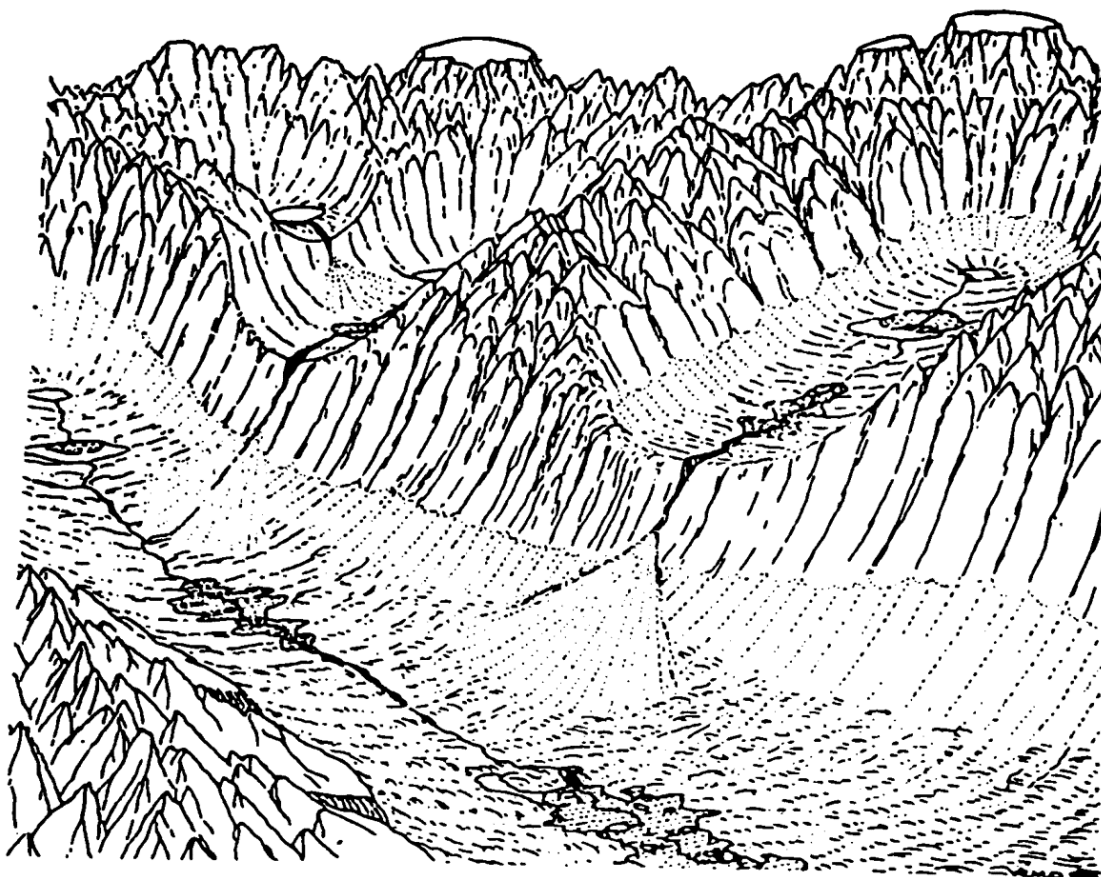


Figura 2.1 – Exemplo de lagos de circo numa cordilheira montanhosa (Wetzel 1993).

Nas zonas mais aplanadas depositaram-se materiais da deriva glaciária, nas partes terminais e por baixo do gelo de escorrência contendo, por vezes, grandes blocos de gelo partido provenientes do glaciário em decréscimo.

Esses blocos de gelo levam por vezes centenas de anos para se fundirem, modificando a morfologia das depressões de várias formas pelos detritos de rocha. Os lagos formados têm a designação de lagos *kettle*, em que as suas bacias lacustres têm forma, inclinação e dimensão irregulares, pois vão ser resultado das irregularidades dos blocos de gelo que as formaram (Hutchinson 1957, Wetzel 1993).

2.4. MORFOMETRIA DOS LAGOS

Aquando de uma descrição de um lago, as características que mais se salientam são, por exemplo, a área, a profundidade, a forma, a cor da água, entre outras. O estudo destas características morfológicas da bacia lacustre é designado por morfometria (Florida Lakewatch 2001, Welch 1948).

De forma a calcular as características morfométricas e melhor descrever a morfologia de um lago, deve-se recorrer a mapas hidrográficos de escala apropriada e também a mapas batimétricos pormenorizados (Welch 1948, Wetzel 1993).

Um mapa batimétrico é semelhante a um mapa topográfico, em que o terreno descrito está submerso (Florida Lakewatch 2001). Este tipo de mapas é obtido por métodos acústicos rigorosos, obtidos, nos dias de hoje, por um radar, permitindo um conhecimento preciso de muito pormenor (Wetzel 1993) que permite então calcular as características morfométricas (Florida Lakewatch 2001).

2.4.1. CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS

Várias são as características morfométricas que podem ser obtidas e calculadas através dos mapas batimétricos. Com base em Hutchinson (1957) e Welch (1948) pode-se calcular a área, o volume, o desenvolvimento do volume, a profundidade máxima, média e relativa, a linha de costa e o desenvolvimento da linha de costa e ainda o comprimento e a largura máximos. Seguidamente será descrito como obter cada uma dessas variáveis.

2.4.1.1. ÁREA

A área pode ser determinada por planimetria, a partir do contorno do mapa com escala adequada (Hutchinson 1957, Welch 1948) (Fig. 2.2).

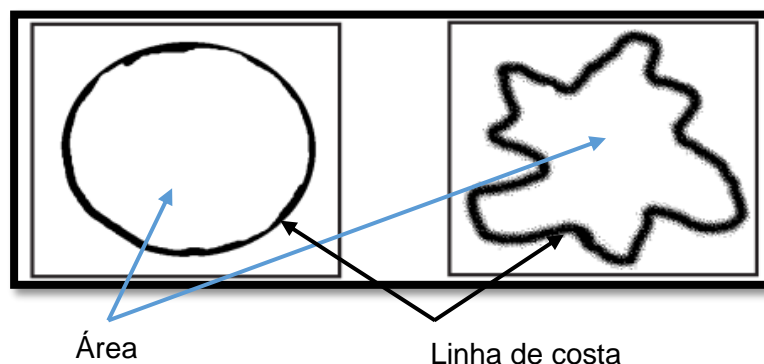


Figura 2.2 – Esquema representativo da área de um lago circular (à esquerda) e de um lago irregular (à direita) e da linha de costa. No lago da esquerda o comprimento da linha de costa vai ter um valor inferior ao do lago da direita (adaptado de Florida Lakewatch 2001).

É uma das características mais importantes a ser determinada porque além de descrever o tamanho do lago, influencia também a sua capacidade de diluição, pois quanto maior a área de superfície, maior a capacidade do lago para diluir materiais, sejam eles de origem natural ou até mesmo introduzidos pelo homem (Florida Lakewatch 2001).

2.4.1.2. VOLUME

Segundo Hutchinson (1957), o volume de um lago pode ser determinado através do integral das áreas (A_z) de todos os estratos às profundidades sucessivas, desde a superfície ($z=0$) até ao ponto de profundidade máxima ($z=z_m$), como na seguinte equação:

$$\text{Volume} = \int_{z=0}^{z=z_m} A_z \cdot dz$$

Pode ainda ser calculado aproximadamente fazendo-se um gráfico, no qual um dos eixos contém as áreas das curvas de nível submersas, com o menor intervalo possível e no outro eixo a profundidade. A área da curva que se obtém, integrando-a por planimetria, vai corresponder ao volume da bacia (Wetzel 1993). Também se pode estimar o volume através da adição das áreas das secções de uma série de cones truncados dos estratos (Welch 1948, Wetzel 1993):

$$\text{Volume} = \frac{h}{3} (a_1 + a_2 + \sqrt{a_1 a_2})$$

onde h corresponde à profundidade de cada estrato na vertical, a_1 à área da superfície superior e a_2 à área da superfície inferior do estrato, do qual o volume se quer determinar (Welch 1948).

O volume de um lago indica a quantidade total de água numa bacia lacustre, tendo em conta que poderá variar com a precipitação. É também um parâmetro importante a calcular por estar relacionado com a capacidade de diluição, quanto maior o volume maior a capacidade para diluir (Florida Lakewatch 2001).

2.4.1.3. DESENVOLVIMENTO DO VOLUME

De acordo com Welch (1948), o índice de desenvolvimento do volume poderá expressar a forma da bacia lacustre. O índice vai representar a razão entre o volume total de um lago e o volume de um cone cuja superfície da base igual à área da superfície do lago e cuja altura é igual à profundidade máxima desse mesmo lago. Simplificando a fórmula é apresentada da seguinte forma:

Desenvolvimento do volume = $3 (z / z_m)$

onde z corresponde à profundidade média e z_m à profundidade máxima. Com este índice podem-se obter intervalos de valor em que (Lake Morphometry 2015):

- desenvolvimento do volume $\approx 1,3$ corresponde à maioria dos lagos;
- desenvolvimento do volume entre 1 e 1,5 corresponde a lagos de material geológico fácil de erodir;
- desenvolvimento do volume $> 1,5$ que normalmente corresponde a lagos instalados em caldeiras vulcânicas, em *graben* ou em fiordes.

2.4.1.4. PROFUNDIDADE MÁXIMA

A profundidade máxima diz respeito à maior profundidade do lago (Wetzel 1993) e pode variar ligeiramente com as variações do nível da água (Hutchinson 1957). Em mapas batimétricos ela por vezes é indicada com uma cruz (X) (Fig. 2.3).

É um parâmetro importante pois influencia o movimento dos sedimentos orgânicos finos, que se encontram no fundo dos lagos, que se podem mover ao longo do fundo do lago ou voltar a ficar suspensos na coluna de água pelas correntes de água ou pelas ondas. (Florida Lakewatch 2001).

2.4.1.5. PROFUNDIDADE MÉDIA

A profundidade média é obtida pela divisão do volume do lago pela sua área de superfície (Hutchinson 1957, Welch 1948).

Contudo se esses valores não puderem ser obtidos pode-se recolher várias medidas da profundidade do lago e depois fazer a sua média. Este último método é no entanto, menos preciso que o primeiro sendo mais útil em pequenos lagos. (Florida Lakewatch 2001).

2.4.1.6. PROFUNDIDADE RELATIVA

Este parâmetro é calculado através da razão da profundidade máxima, como percentagem do diâmetro médio do lago à superfície, expresso em percentagem, como se mostra na seguinte fórmula (Wetzel 1993):

$$\text{Profundidade relativa} = \frac{50 z_m \sqrt{\pi}}{\sqrt{A_0}}$$

Uma grande parte dos lagos tem uma profundidade relativa inferior a 2%, tendo os lagos mais profundos com áreas superficiais mais pequenas geralmente um valor superior a 4% (Wetzel 1993).

2.4.1.7. LINHA DE COSTA

A linha de costa é uma medida linear do perímetro do corpo de água (Figs. 2.2 e 2.3), correspondendo ao local onde ocorre a interface entre a água da bacia lacustre e a área envolvente; vai variar com a precipitação e é um parâmetro importante para planejar atividades e para a gestão das plantas aquáticas (Florida Lakewatch 2001). Está dependente do detalhe do mapa através do qual se faz a medição e assim os valores obtidos em mapas de diferentes escalas podem variar (Hutchinson 1957).

Em lagos permanentes este parâmetro é constante, especialmente nos lagos naturais, enquanto nos efémeros, e sobretudo em albufeiras, devido à precipitação e descargas, a linha de costa sofre maior variação (Wetzel 1993)

2.4.1.8. DESENVOLVIMENTO DA LINHA DE COSTA

O desenvolvimento da linha de costa é a razão entre o comprimento da linha de costa e uma circunferência de um círculo de área igual à do lago:

$$\text{Desenvolvimento da linha de costa} = \frac{\text{Comprimento da linha de costa}}{2\sqrt{\pi A}}$$

Vai apresentar as mesmas incertezas que o comprimento da linha de costa apresenta (Hutchinson 1957).

Este índice não vai ser, obviamente inferior à unidade e vai aumentando conforme o lago for mais alongado (Hutchinson 1957, Welch 1948) conforme os seguintes valores (Lake morphometry 2015, SWCSMH 2015, Wetzel 1993):

- desenvolvimento da linha e costa = 1 para lagos circulares, de cratera;
- desenvolvimento da linha de costa ≈ 2 para lagos de forma subcircular e elítica, ou seja, a maioria dos lagos;
- desenvolvimento da linha de costa vai ser mais elevado conforme mais alongado vai ser o lago, como são exemplo os lagos instalados em vales.

É um parâmetro a ter em conta pois vai ajudar a refletir o potencial do desenvolvimento das comunidades litorais (Wetzel 1993).

2.4.1.9. COMPRIMENTO MÁXIMO

Segundo Florida Lakewatch (2001) o comprimento máximo (Fig. 2.3) vai ser a distância entre dois pontos do lago, à superfície e que se encontram o mais afastados possível em linha reta, tendo em conta que não podem intersestar massas de terra.

É um parâmetro a ter em conta, pois poderá influenciar a profundidade a que as ondas possam misturar água e/ou sedimentos do fundo do lago. Lagos onde o

comprimento máximo é bastante grande e não intersecta nenhuma massa de terra, as ondas têm potencial para erodir a linha de costa. Esta característica não está presente em lagos de pequenas dimensões, pois as ondas não vão ser longas e também não vão misturar as águas com tanta eficácia, como o que acontece em lagos de dimensões mais elevadas, pois normalmente quanto maior o lago maior o seu potencial para misturar as águas (Florida Lakewatch 2001).

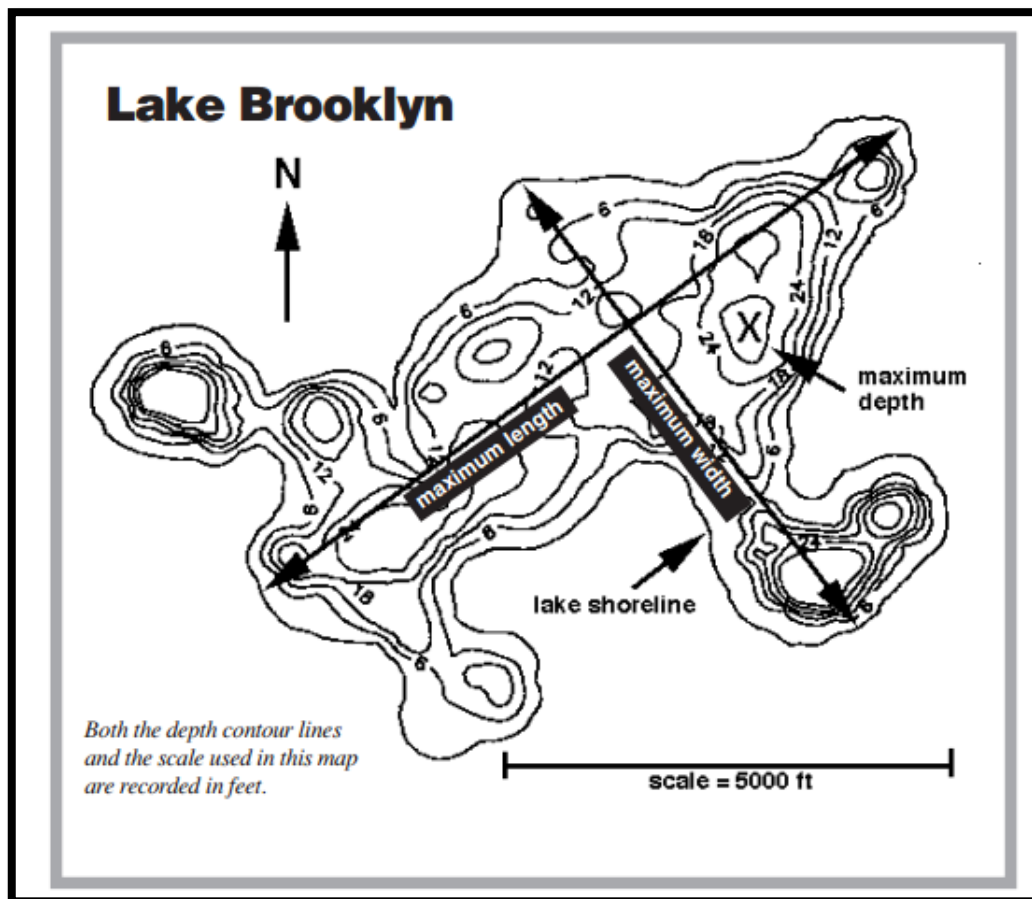


Figura 2.3 – Exemplo da medição do comprimento máximo (“maximum length”), da largura máxima (“maximum width”), da representação profundidade máxima (“maximum depth”) e da linha de costa (“lake shoreline”) de um lago (adaptado de Florida Lakewatch 2001).

2.4.1.10. LARGURA MÁXIMA

Este parâmetro obtém-se medindo a distância máxima do lago, perpendicularmente à linha do comprimento máximo (Wetzel 1993) (Fig. 2.3), não atravessando massas de terra, a não ser que sejam pequenas “ilhas” (Welch 1948).

É um parâmetro a ter em consideração pois também vai influenciar a mistura de água e/ou sedimentos do fundo do lago (Florida Lakewatch 2001).

A largura média de um lago é calculada através da divisão entre a área da superfície do lago e o seu comprimento máximo (Florida Lakewatch 2001, Wetzel 1993). É também importante pois pode ajudar a prever a quantidade de água que vai ser misturada aquando da ocorrência de fortes ventos no lago (Florida Lakewatch 2001).

3. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO E CLIMATOLÓGICO

A Serra da Estrela está situada na Zona Centro Ibérica (ZCI) do Maciço Ibérico, constituindo o setor mais ocidental da Cordilheira Central Ibérica (Ribeiro 1954, Ribeiro *et al.* 1990), cordilheira essa que apresenta uma direção ENE – WSW e atravessa toda a Península Ibérica (Carreira *et al.* 2011). A Cordilheira Central Ibérica corresponde a uma morfoestrutura do tipo “montanha em blocos” (Ribeiro 1954), com cerca de 500 quilómetros de extensão e 40 quilómetros de largura, prolongando-se desde a Serra da Lousã, até Somosierra, a norte de Madrid (Fig. 3.1) (Espinha Marques *et al.* 2006).

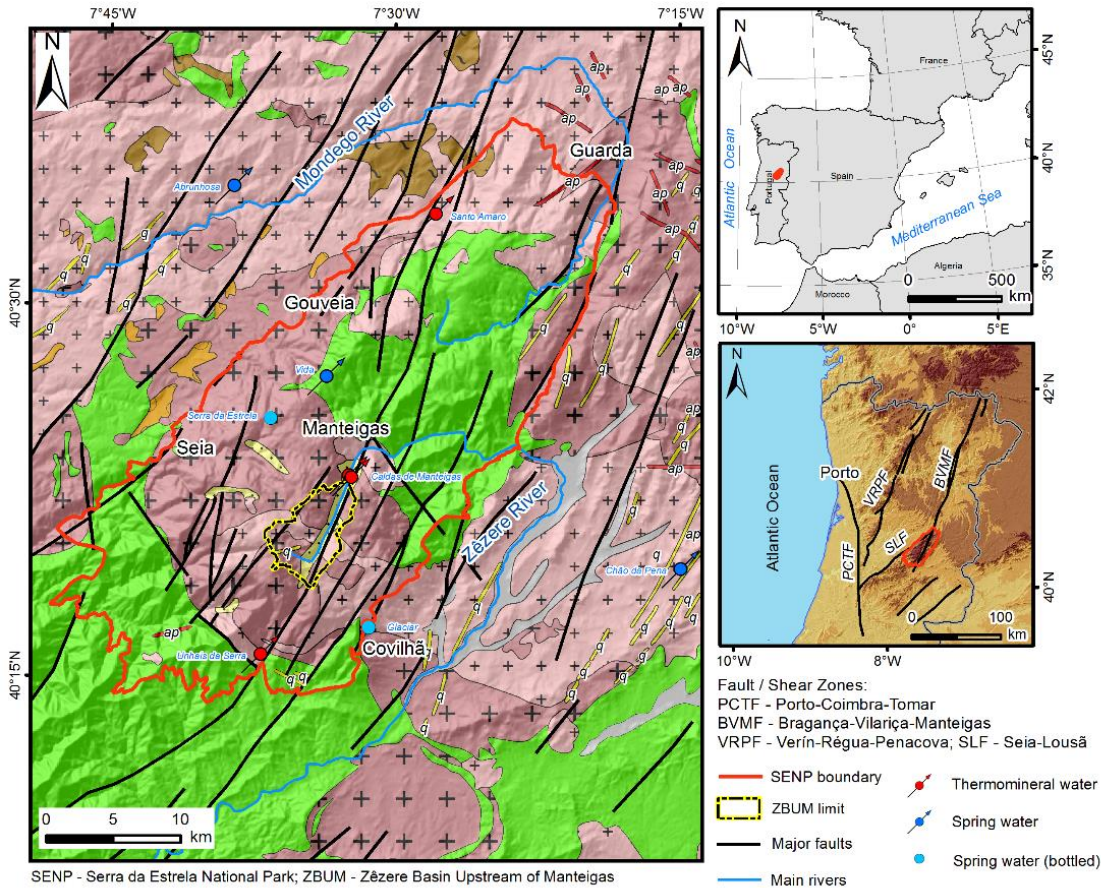


Figura 3.1 – A Serra da Estrela na Península Ibérica e a localização da Cordilheira Central Ibérica (Espinha Marques 2007).

O maciço montanhoso da Serra da Estrela situa-se entre a cidade da Guarda e a Serra da Lousã, correspondendo a uma elevação com aproximadamente 115 Km de comprimento e 25 Km de largura, de direção NE – SW e altitude máxima de 1993 m no Alto da Torre (ponto mais elevado de Portugal Continental) (Lautensach 1932, Daveau 1969).

A serra da Estrela é uma montanha que exhibe características geológicas, geomorfológicas e climatológicas particulares que vão ter impacto e um papel importante no ciclo da água local, particularmente no subciclo hidrogeológico regional e consequentemente na disponibilidade de recursos hídricos; recursos esses de elevada

qualidade e valor económico, que incluem as águas superficiais e subterrâneas (normais e termominerais) (Fig. 3.2) (Espinha Marques *et al.* 2005, Espinha Marques *et al.* 2006, Espinha Marques *et al.* 2009).












Regional Hydrogeological Unit (Adapted from INAG 2004 and Carvalho et al. 2007)		Type of media		Transmissivity (T, m ² /day)	Long-term well capacity (Q, L/s) Median long-term well capacity		
		Porous	Fissured		Q < 1	1 < Q < 2	2 < Q < 5
Sedimentary cover							
Alluvia: detritical sedimentary deposits generally poorly consolidated		x		-		x	
Glacial and fluvioglacial deposits: detrital sedimentary deposits		x		-	x	x	
Conglomerates and arkoses: sedimentary cover, generally detritical, consolidated		x	x	-	x	x	
Metasedimentary Rocks							
Schists, graywackes, metaconglomerates; quartzic and pelitic hornfels			x	3	x	x	
Granitic Rocks							
Granites, medium to coarse grained, with feldspar megacrystals			x	1,7	x		
Granites, medium to fine grained, essentially biotitic			x	1,7	x		
Gneisses and migmatites			x	1,7	x		
Veins							
Aplite and pegmatite			x	-		x	x
Quartz			x	-		x	x

Figura 3.2 – Geologia da região da Serra da Estrela (extraído de Espinha Marques *et al.* 2013, base geológica revista de Oliveira *et al.* 1992).

A geologia do maciço montanhoso da Serra da Estrela (Fig. 3.2), é uma componente fundamental do sistema hidrológico regional, uma vez que controla algumas das suas principais características, nomeadamente a infiltração, a recarga dos aquíferos, o tipo de meio de circulação (poroso vs. fissurado), os trajetos do fluxo subterrâneo ou a hidrogeoquímica (Espinha Marques 2007, Espinha Marques et al. 2011a, Espinha Marques et al. 2008, Espinha Marques 2010).

Esta montanha é dominada pela presença de rochas graníticas, que se formaram durante o ciclo Varisco e por rochas metassedimentares do Proterozóico superior a Câmbrio inferior, o chamado “Complexo Xisto-grauváquico” (CXG), do Grupo das Beiras.

Estão presentes ainda rochas sedimentares, mas em áreas mais pequenas, que correspondem a depósitos de cobertura de natureza aluvionar, glaciária e fluvioglaciária, e sedimentos arcósico-argilosos (Teixeira *et al.* 1967, 1974, Ferreira & Vieira 1999). O mapa da Figura 3.2 mostra uma síntese da hidrogeologia da região, elaborada com base em Carvalho *et al.* (2007).

A nível local, a região da BZMM é constituída por três principais litótipos (Fig. 3.3): (i) rochas graníticas de idade Varisca; (ii) rochas metassedimentares de idade Precâmbrica-Câmbria; (iii) depósitos aluvionares e glaciários do Quaternário.

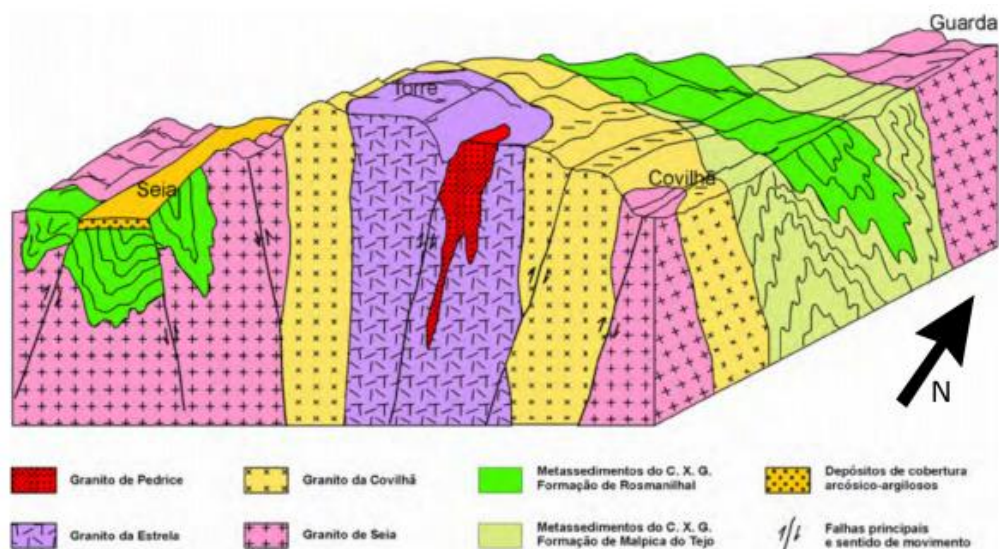


Figura 3.3 – Bloco diagrama esquemático da geologia da Serra da Estrela (Ferreira & Vieira 1999).

A Cordilheira Central corresponde, segundo o modelo genético proposto por Ribeiro (1988) a um *horst* compressivo orientado subparalelamente à cordilheira Bética (Fig. 3.4), estando delimitado a NNW e a SSE por acidentes tectónicos paralelos. Relativamente à Serra da Estrela, as estruturas delimitadas seriam a Falha de Gouveia-Seia-Lousã (FGSL) no limite NW e a Falha de Pônsul (FP) no limite SE. O mesmo autor sugere também que a compressão das Cadeias Béticas teria provocado um deslocamento na base da crosta (ao nível do Moho), correspondendo a Cordilheira Central a uma estrutura de “ressalto” (do tipo *pop-up*) entre um cavalgamento para NNW e um retrocavalgamento para SSE.

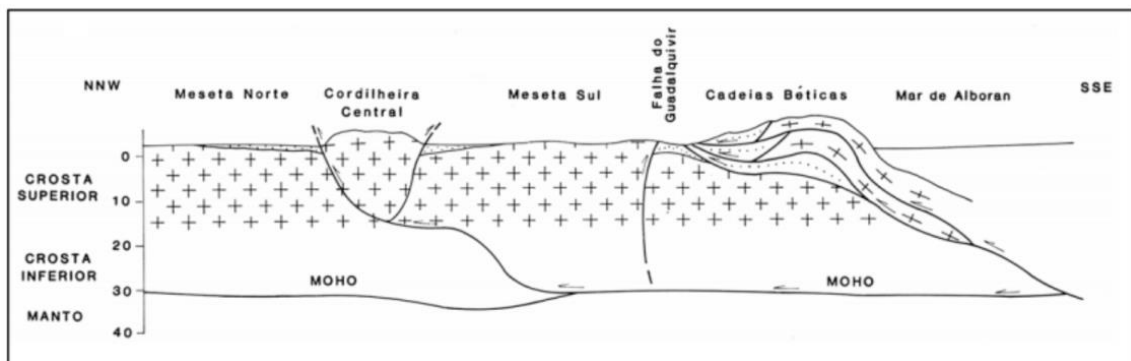


Figura 3.4 – Modelo genético da Cordilheira Central (Ribeiro 1988).

Na área estudada, a tectónica é controlada pela megaestrutura regional designada zona de falha de Bragança-Vilaríça-Manteigas (ZFBVM), um desligamento esquerdo, que compõe uma das mais importantes estruturas do sistema tardi-Varisco de fraturas do Noroeste da Ibéria (Fig. 3.5). Durante a compressão Alpina, no Cenozóico, houve a reativação desta estrutura e de falhas regionais sobretudo inversas (como a falha de Seia-Lousã), que levaram ao soerguimento do maciço montanhoso da Serra da Estrela sob forma de um *horst* numa estrutura do tipo *pop-up* (Ribeiro 1988, Ribeiro *et al.* 1990).

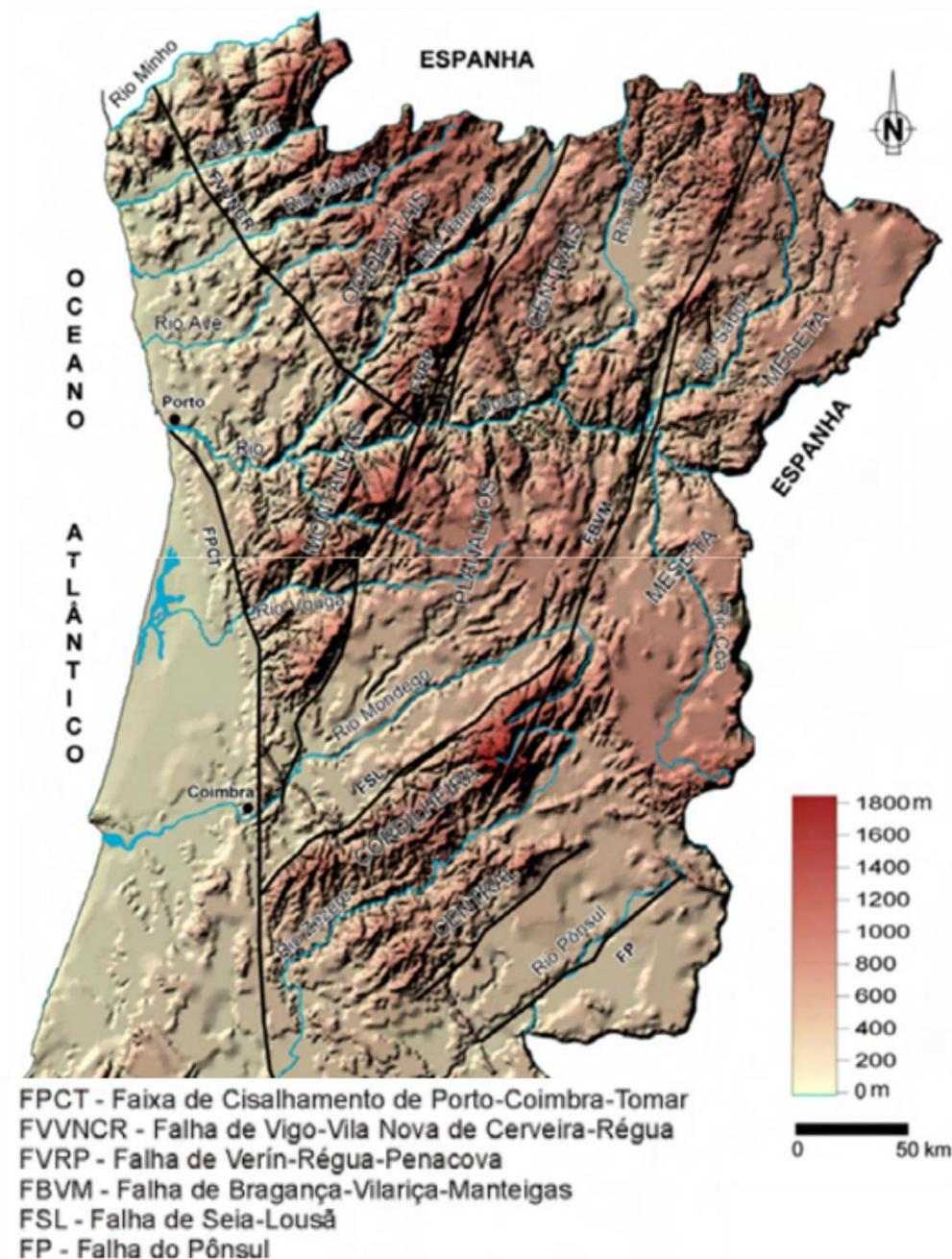


Figura 3.5 – Principais estruturas tectónicas do Norte e Centro de Portugal (adaptado de Carvalho 2006).

O relevo do setor da BZMM é dominado por dois planaltos principais que se encontram divididos pelo vale glacial do rio Zêzere (de orientação NNE-SSW), um deles corresponde ao planalto da Torre-Penhas Douradas (1450-1993 metros) a ocidente e o outro ao planalto do Alto da Pedrice-Curral do Vento (1450-1761 metros) a oriente (Fig. 3.6) (Espinha Marques *et al.* 2008).

Estes planaltos apresentam superfícies aplanadas a diferentes altitudes e alguns vales amplos. É uma região que foi marcada pela glaciação durante o Último Máximo da Glaciação, apresentando uma geomorfologia glaciária do Plistocénico Superior e depósitos associados (e.g., Daveau *et al.* 1997, Vieira 2004).

Relativamente ao clima da Serra da Estrela, ele é caracterizado por verões quentes e secos, típico de climas mediterrâneos, sendo controlado pela circulação de ar vinda predominantemente do Atlântico Norte e pela altitude (Daveau *et al.* 1997, Vieira 2004, Mora 2006).

A estação húmida ocorre entre os meses de outubro e maio, em que a precipitação média anual, na maioria da área dos planaltos é superior a 2000 milímetros, chegando, nas imediações da torre a ultrapassar os 2500 milímetros.

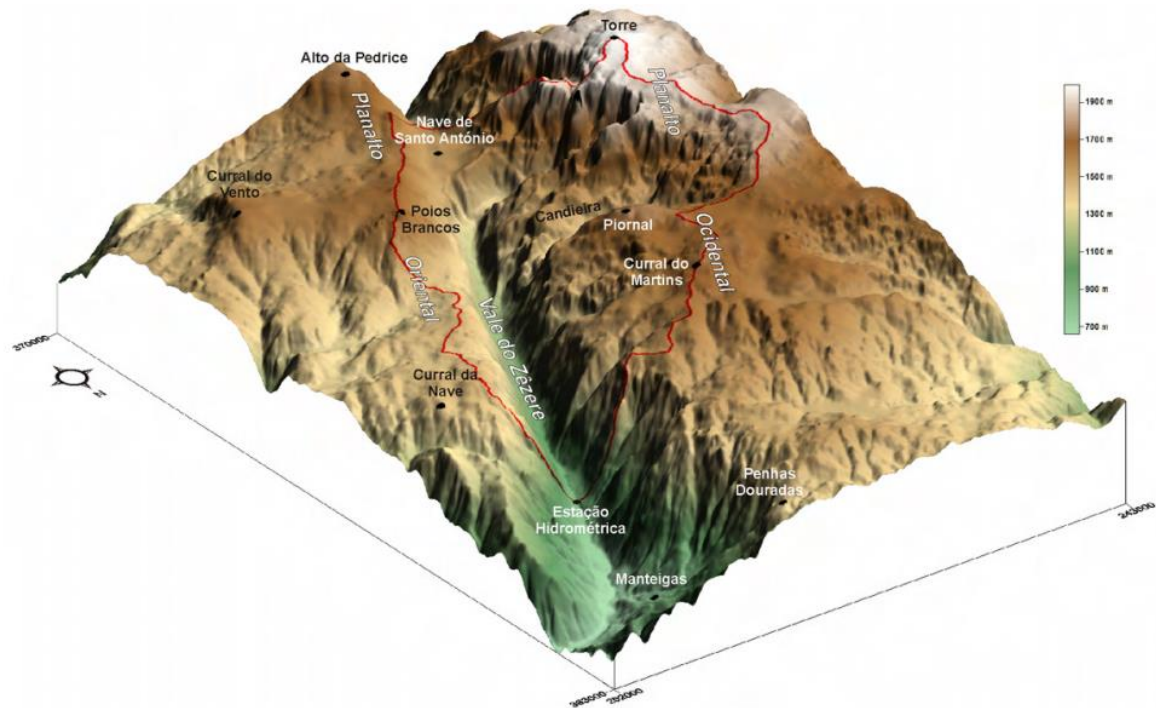


Figura 3.6 – Morfologia da região da BZMM (Espinha Marques 2007).

Este facto poderá ser explicado pelo controlo imposto pela altitude da própria serra e pela sua orientação em relação aos fluxos das massas de ar dominantes (Vieira & Mora 1998).

A zona ocidental do maciço montanhoso apresenta um maior número de dias com precipitação do que a zona oriental, mas um valor médio anual ligeiramente inferior. No entanto, observa-se à escala regional um aumento da precipitação com a altitude, apesar disso, à escala local, a distribuição espacial da precipitação é de difícil interpretação devido à sua ligação com o fluxo de massas de ar, particularmente com mecanismos complexos de convergência e divergência controlados pela morfologia da montanha.

Vários são os estudos que referem uma irregularidade espacial e temporal dos fenómenos relacionados com a neve (Andrade *et al.* 1992, Mora & Vieira 2004).

O papel que a neve desempenha na infiltração e recarga dos aquíferos (importância hidrológica da neve) leva ao interesse de um estudo cuidado no conhecimento do seu padrão de precipitação e evolução sazonal da cobertura nivosa.

A Serra da Estrela é caracterizada por um regime térmico simples, em que o mês mais quente é julho e o mais frio janeiro, apresentando uma temperatura média anual inferior a 7°C na maior parte da área dos planaltos, sendo no Alto da Torre inferior a 4°C (Vieira & Mora 1998, Espinha Marques *et al.* 2009).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é do tipo *Cbs*, ou seja, de temperaturas amenas, com verões amenos e secos (Kottek *et al.* 2006, Peel *et al.* 2007). Para sul da Serra da Estrela o clima é do tipo *Csa*, isto é, de temperaturas amenas com verões quentes e secos. Consequentemente esta classificação climática evidencia a ideia de que o clima da Serra da Estrela não é tipicamente Mediterrâneo, uma vez que esta região está localizada na zona de transição entre a influência do Oceano Atlântico e a do Mar Mediterrâneo (Espinha Marques *et al.* 2013).

A distribuição da infiltração, recarga e circulação nos aquíferos é controlada pelo tipo de porosidade do meio (poroso vs. fissurado). O meio poroso é dominante nos depósitos glaciários e aluvionares do quaternário, assim como na maioria das rochas graníticas e metassedimentares alteradas. Ocorre em zonas mais superficiais, normalmente com menos de 50 metros de profundidade. O meio fissurado predomina nas rochas pouco alteradas, muito próximo da superfície – especialmente nas áreas de afloramentos rochosos, onde a cobertura sedimentar é reduzida ou mesmo ausente – ou sob os materiais geológicos porosos referidos. Devido ao predomínio de rochas graníticas e metassedimentares na região, a circulação de água subterrânea ocorre principalmente em meio fissurado e em menor medida, em meio poroso (Carvalho *et al.* 2012, Espinha Marques *et al.* 2005, Espinha Marques 2010).

Com base nas unidades hidrogeológicas regionais, foram definidas por Espinha Marques (2007) diversas unidades hidrogeológicas para a BZMM, com o intuito de apoiar futuros trabalhos, nomeadamente o estudo hidrogeoquímico, a modelação hidrológica, a definição de unidades hidrogeomorfológicas e até a elaboração de modelos conceptuais. Assim sendo, foram definidas as seguintes unidades hidrogeológicas regionais, que correspondem às unidades geológicas principais: (i) Depósitos de cobertura que abrangem localmente depósitos aluvionares, glaciários e fluvioglaciários; (ii) Rochas metassedimentares, localmente constituídas por xisto, grauvaques e metaconglomerados; (iii) Rochas graníticas, correspondentes a diversos tipos de granitóides (Fig. 3.7) (Espinha Marques 2007, 2010).

Também na região da BZMM, foram definidas unidades hidrogeomorfológicas devido à necessidade de se identificarem áreas homogéneas relativamente aos

principais fatores condicionantes da infiltração, recarga e descarga dos aquíferos: relevo, substrato geológico, condições climáticas e a cobertura vegetal (Espinha Marques *et al.* 2006, Espinha Marques 2007).

A caracterização dessas unidades foi realizada em termos da prevalência das litologias presentes, dos tipos de perfil do solo, dos grupos hidrológicos de solos e das formas de ocupação do solo, assim como quanto ao processo hidrológico principal (recarga ou descarga). No culminar de todas essas características foram definidas nove unidades hidrogeomorfológicas (Fig. 3.8), denominadas segundo a forma de relevo: (1) Planalto Oriental; (2) Encostas Orientais; (3) Fundo de Vale (inferior); (4) Colo da Nave de Santo António; (5) Fundo de Vale (superior); (6) Encostas Ocidentais; (7) Encostas dos Cântaros; (8) Planalto Ocidental (inferior); (9) Planalto Ocidental (superior) (Espinha Marques *et al.* 2006).

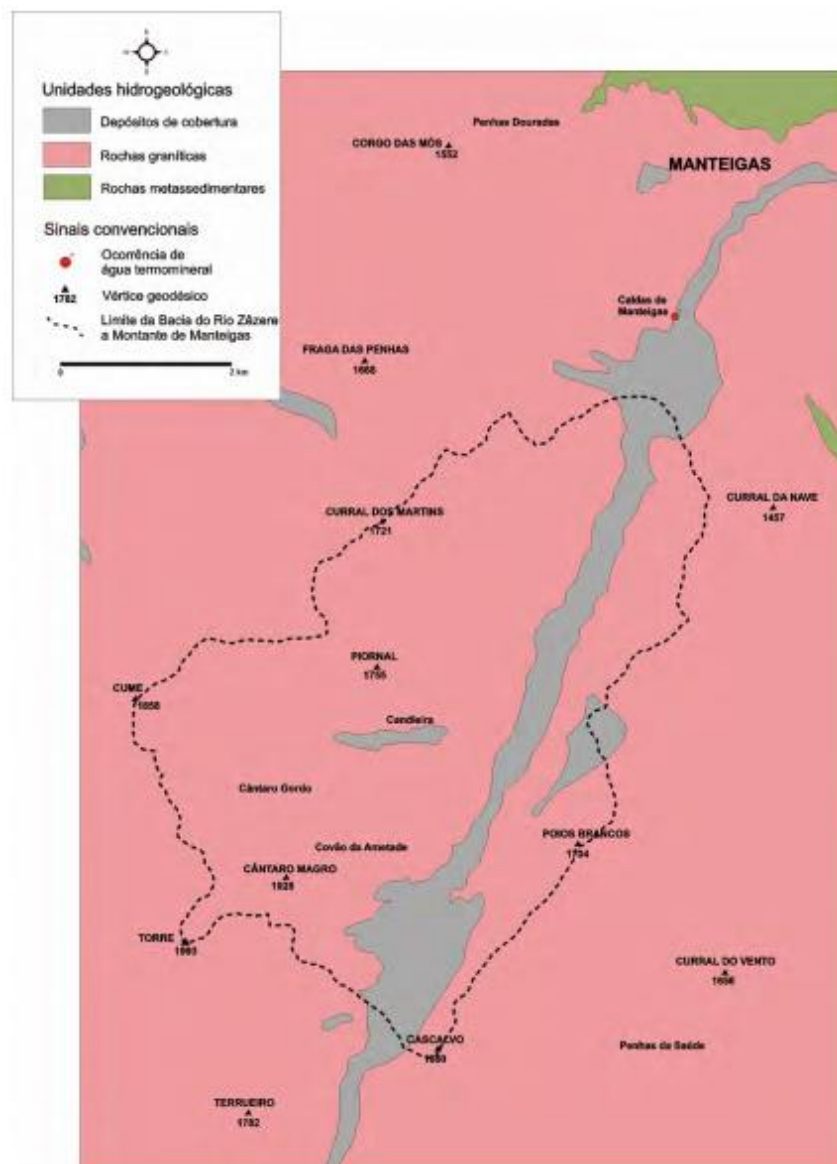


Figura 3.7 – Unidades Hidrogeológicas da BZMM (Espinha Marques 2007).

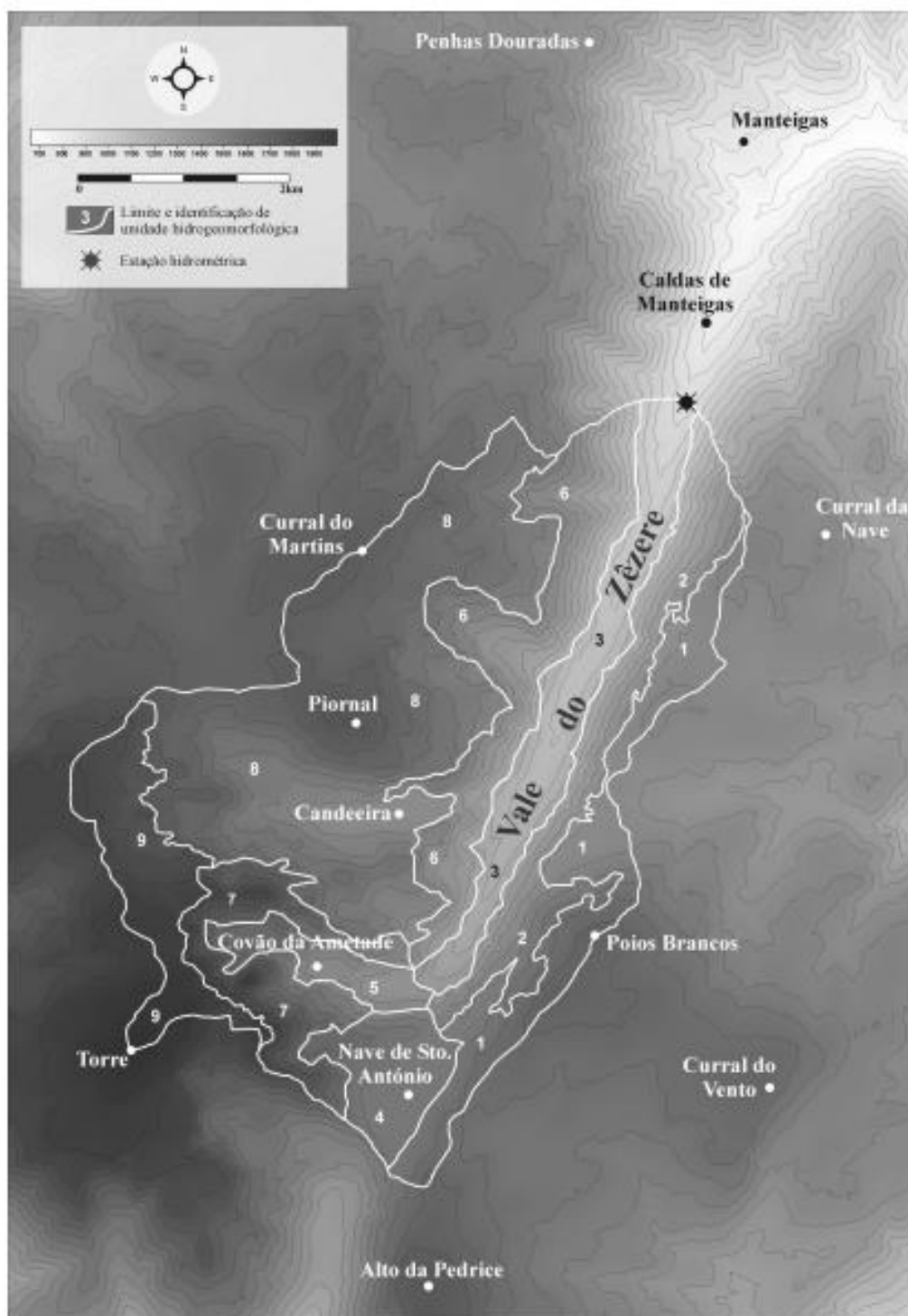


Figura 3.8 – Unidades Hidrogeomorfológicas da BZMM: (1) Planalto Oriental; (2) Encostas Orientais; (3) Fundo de Vale (inferior); (4) Colo da Nave de Santo António; (5) Fundo de Vale (superior); (6) Encostas Ocidentais; (7) Encostas dos Cântaros; (8) Planalto Ocidental (inferior); (9) Planalto Ocidental (superior) (Espinha Marques *et al.* 2006).

A Serra da Estrela contém pequenas lagoas que foram formadas aquando da última glaciação, há cerca de 20 000 anos, no período quaternário, que atingiu esta zona (Fig. 3.9). Esta glaciação levou à existência de neves perpétuas e glaciares associados, que deram origem à morfologia característica da serra (Fig. 3.10), principalmente na parte mais alta, na qual os glaciares eram mais pronunciados. (Ferreira & Vieira 1999, Vieira 2008). De acordo com a definição dada no capítulo 2 da presente dissertação, considerou-se os corpos de água da Serra da Estrela a serem estudados como lagoas, por não terem grandes dimensões e não serem muito profundos.

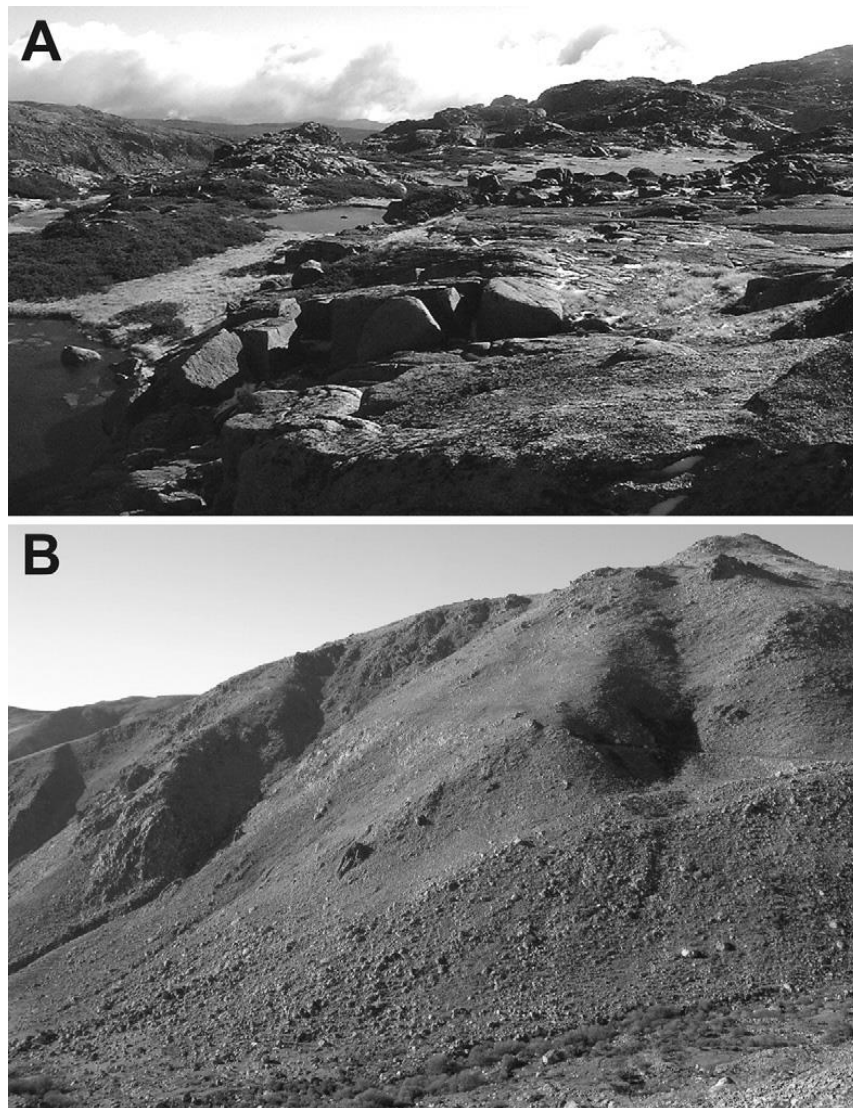


Figura 3.9 – Aspeto da erosão glaciária numa área planáltica do maciço granítico (A); moreia lateral no vale de Alforja (B) (Vieira 2008).

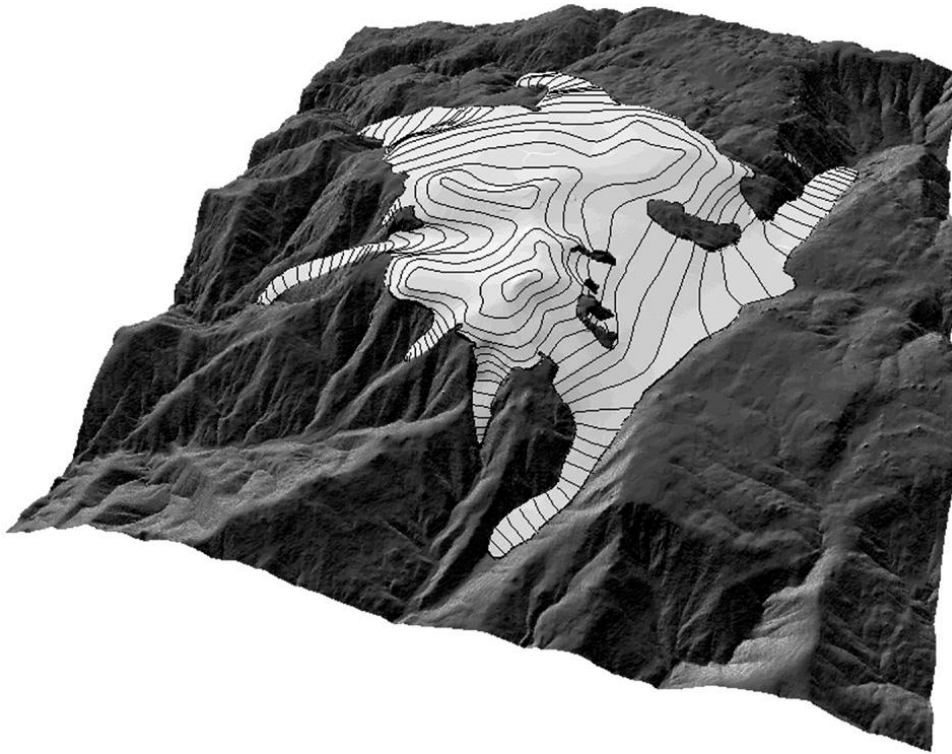


Figura 3.10 – Aspeto dos glaciares da Serra da Estrela obtido através de modelação matemática (Vieira 2008).

4. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA DAS LAGOAS

Os corpos de água alvo do presente estudo foram considerados lagoas, de acordo com os critérios apresentados no capítulo 2: por serem de pequenas dimensões e pouco profundos. A Serra da Estrela contém inúmeras lagoas geradas pela atividade glaciária que ocorreu há cerca de 20 000 anos naquela região.

Foram selecionadas sete lagoas para o presente estudo, representativas das lagoas não afetadas por barragens e com diferentes localizações relativamente às rodovias, de modo a permitir compreender a influência da utilização de sais para a limpeza da neve das estradas. As lagoas selecionadas estão representadas na Figura 4.1.

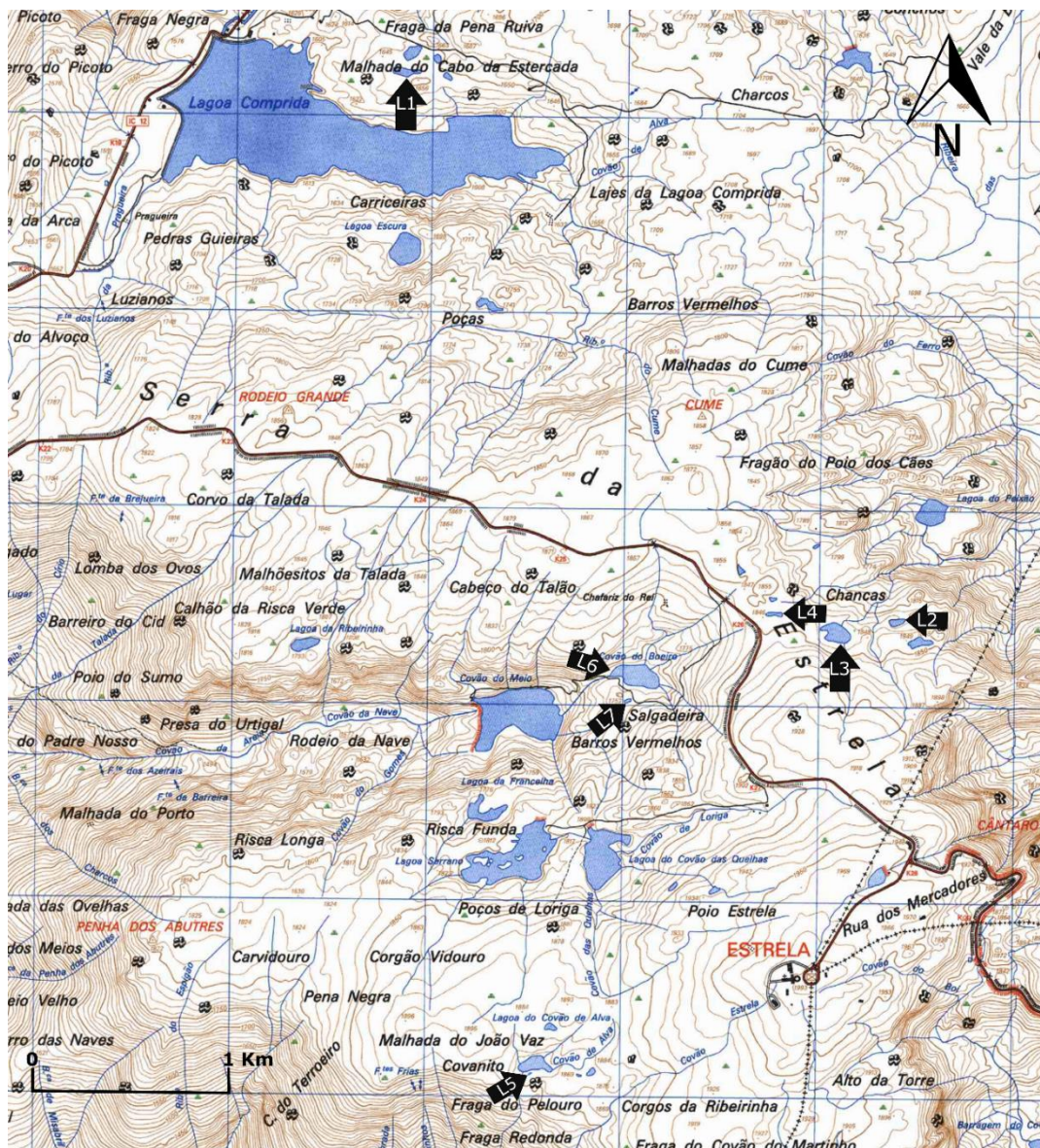


Figura 4.1 – Mapa da localização das lagoas estudadas (base cartográfica: Carta Militar nº 223 à escala 1/25 000).

4.1. INVENTÁRIO DE PONTOS DE ÁGUA

O inventário de pontos de água foi um dos primeiros trabalhos a ser realizado. É um meio eficaz que tem como finalidade servir de suporte ao estudo hidrológico, recolhendo informação básica acerca do local de investigação.

Com base em referências e modelos de Wetzel (1993), Florida Lakewatch (2001), Hoffman *et al.* (2005) e Tiberti *et al.* (2010), foi adotado, para as lagoas da Serra da Estrela, o modelo da ficha de inventário apresentado no Anexo I, no qual constam informações relativas à identificação da lagoa, cartografia militar e geológica, localização (incluindo coordenadas geográficas e altitude), propriedades físico-químicas da lagoa (temperatura, pH e condutividade elétrica), litologia da bacia hidrogeológica, características morfométricas da lagoa, entre outras.

Para o preenchimento do inventário recorreu-se à Carta Topográfica 223-Loriga (Seia), à escala 1/25 000 (Fig. 4.1); à Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela, à escala 1/75 000 (Fig. 4.2) para determinação da litologia da bacia hidrogeológica, ao programa Google Earth, para a localização e Google Earth Pro para as medições efetuadas em cada lagoa.

Na Figura 4.3 encontra-se um exemplo do preenchimento do inventário de pontos de água para a lagoa L1 e no Anexo I as restantes fichas para cada uma das lagoas estudadas. A inventariação das lagoas decorreu no mês de janeiro de 2016, tendo sido efetuada a medição *in situ* da temperatura, pH e condutividade elétrica da água.

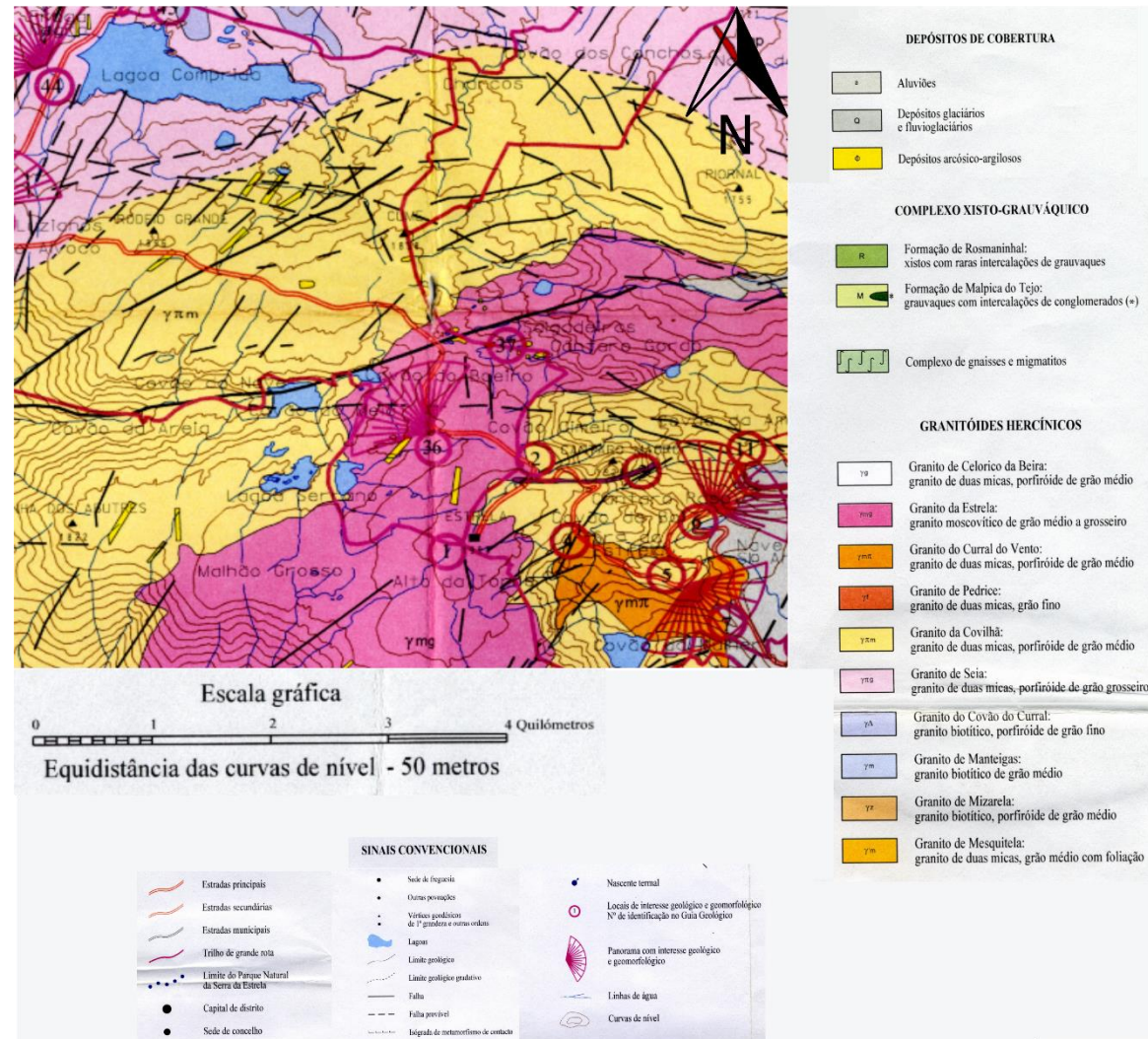


Figura 4.2 – Geologia da região da região estudada (adaptado da Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela, à escala 1/75 000) (Ferreira & Silva 1999).

Inventário de pontos de água



Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L1	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 21' 48.9" N 7° 38' 14.3" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1645	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 4,9	(7) <u>pH:</u> 5,06	(8) <u>Condutividade Elétrica (μS/cm):</u> 9,56
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m 1-2 m X > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito de Seia – granito de duas micas, porfiróide de grão grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale Planalto X Encosta Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 130	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 35	(18) <u>Área – A (m²):</u> 3463
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (3463/130) 26,64		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 324
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (324/2√(π3463)) 1,55 (Lagoa de forma elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 

Figura 4.3 – Exemplo do modelo adotado do inventário de pontos de água.

4.2. ESTUDO MORFOMÉTRICO DAS LAGOAS

O estudo morfométrico baseou-se em medições realizadas em fotografias de satélite com auxílio da aplicação informática *Google Earth Pro*. Foram determinadas as seguintes características de cada lagoa: a altitude, a área, a linha de costa (comumente designada por perímetro), o desenvolvimento da linha de costa, o comprimento máximo e a largura máxima.

Como foi referido no capítulo 2, o estudo morfométrico deveria começar pela análise de um mapa batimétrico, o que não é possível no caso das lagoas da Serra da Estrela. Por esse motivo, o volume e a profundidade não puderam ser estudados, tendo apenas sido possível realizar uma estimativa da profundidade máxima por observação *in situ*.

Torres (2015) delimitou as bacias hidrográficas das lagoas tendo os respetivos limites sido determinados com base na análise do mapa topográfico na escala 1/25 000. Segundo este estudo, apenas as lagoas L3 e L6 têm bacia hidrográfica associada.

Seguidamente é apresentada a caracterização morfométrica de cada uma das lagoas em estudo. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 4.1.

LAGOA L1

Na Figura 4.4 é possível observar as medições realizadas na lagoa L1, as quais constam na Tabela 4.1, onde estão apresentadas as características morfométricas da lagoa. Esta não apresenta bacia hidrográfica associada, é uma lagoa isolada, não exibindo entradas de água superficial, tendo como principal meio de alimentação a água proveniente da precipitação sob forma de chuva e neve (Fig. 4.5). Quanto a saídas de água, para além da evaporação, o terreno circundante da lagoa apresenta uma pequena inclinação para este, onde uma pequena parte da água poderá escapar caso a lagoa se encontre no nível máximo. Esta lagoa encontra-se numa zona de planalto e estima-se que a sua profundidade máxima, não deverá ultrapassar 1 metro.



Figura 4.4 – Mapa da lagoa L1 com as medições realizadas através do *Google Earth Pro*.



Figura 4.5 – Aspeto da Lagoa L1 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L2

Na Figura 4.6 está presente o mapa com as medições das características morfométricas da lagoa L2, as quais se encontram reunidas na Tabela 4.1. Esta lagoa é também uma lagoa isolada, no que respeita à entrada e saída de água superficial, não apresentando bacia hidrográfica. A água entra por precipitação e, eventualmente, por escoamento subterrâneo e sai por evaporação e, eventualmente, infiltração (Fig. 4.7). É uma lagoa situada numa encosta, aparentando ser profunda, com mais de 2 metros de profundidade.

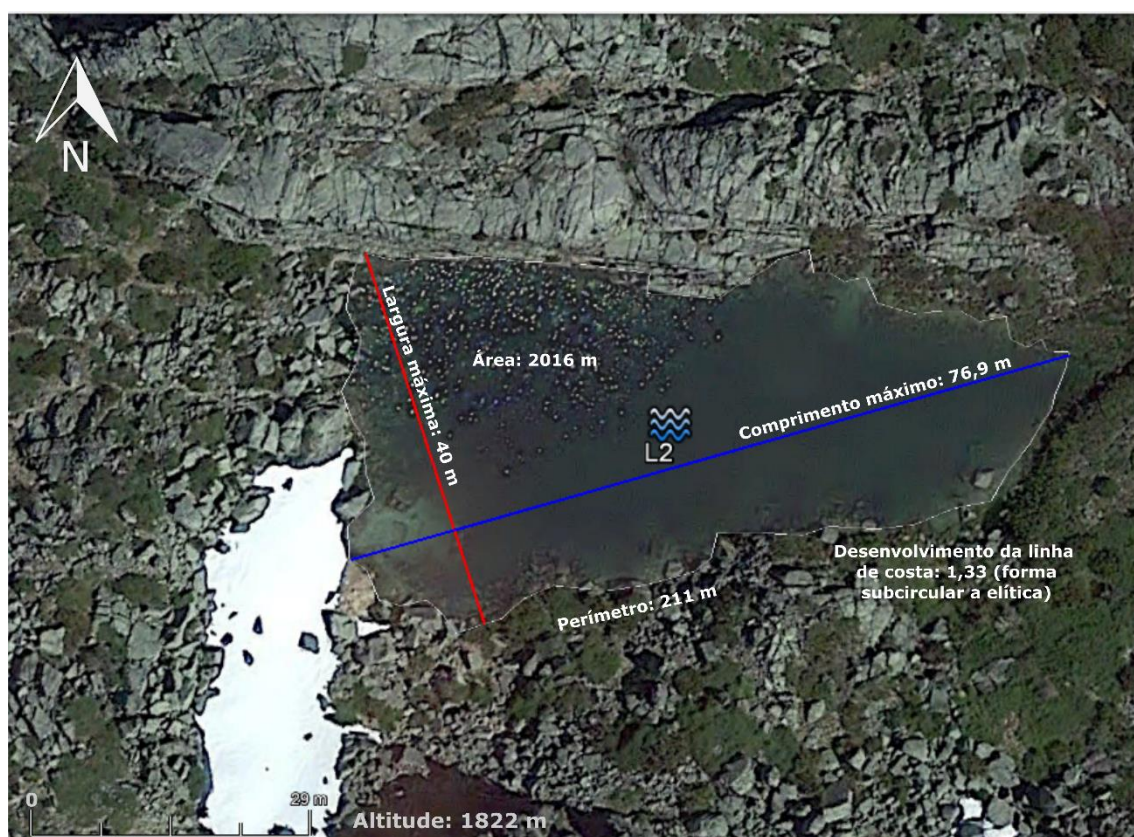


Figura 4.6 – Mapa da lagoa L2 com as medições realizadas através do *Google Earth Pro*



Figura 4.7 – Aspeto da lagoa L2 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L3

As medições relativas à lagoa L3 estão presentes na Figura 4.8 e na Tabela 4.1. É uma lagoa que se encontra parcialmente colmatada por sedimentos, em que a água se encontra em depressões e canais no cervunal. Apresenta bacia hidrográfica, com aproximadamente 180 000 m² (Torres 2015) (Fig. 4.9). A entrada de água ocorre, essencialmente, pela precipitação e, complementarmente, pelo escoamento subterrâneo e escoamento superficial. A saída de água ocorre, fundamentalmente, por evapotranspiração e em menor medida, por infiltração e escoamento superficial. A lagoa está numa zona de fundo de vale, tendo uma profundidade inferior a 1 metro (Fig. 4.10).



Figura 4.8 – Mapa da lagoa L3 com as medições realizadas através do *Google Earth Pro*

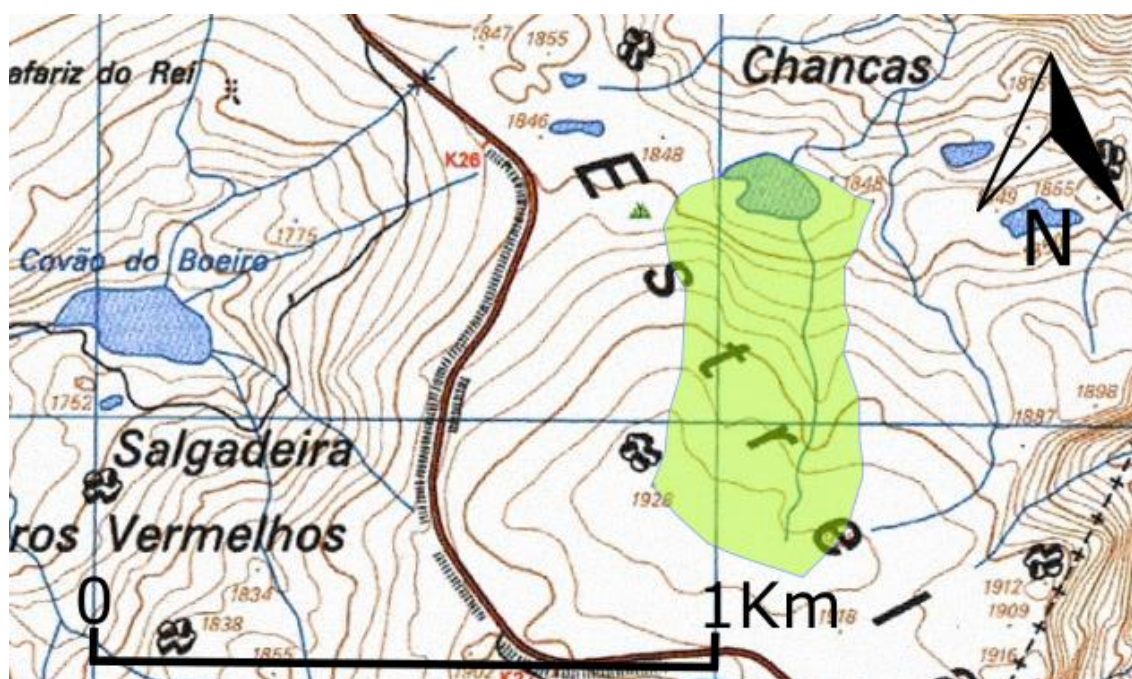


Figura 4.9 – Representação da bacia hidrográfica da lagoa L3 na carta militar nº 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 (Torres 2015).



Figura 4.10 – Aspeto da lagoa L3 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L4

Na Figura 4.11 está presente o mapa com as medições realizadas na lagoa L4, e que se encontram reunidas na Tabela 4.1. A lagoa não tem bacia hidrográfica associada, as entradas de água apenas ocorrem pela precipitação em forma de chuva ou neve (Fig. 4.12). Relativamente à saída de água, esta ocorre sobretudo pela evaporação, temporariamente, um reduzido volume poderá sair quer por uma pequena saída de água superficial, a nordeste, caso a lagoa se encontre no nível máximo, quer por infiltração. A lagoa encontra-se numa portela com profundidade entre 1 a 2 metros.

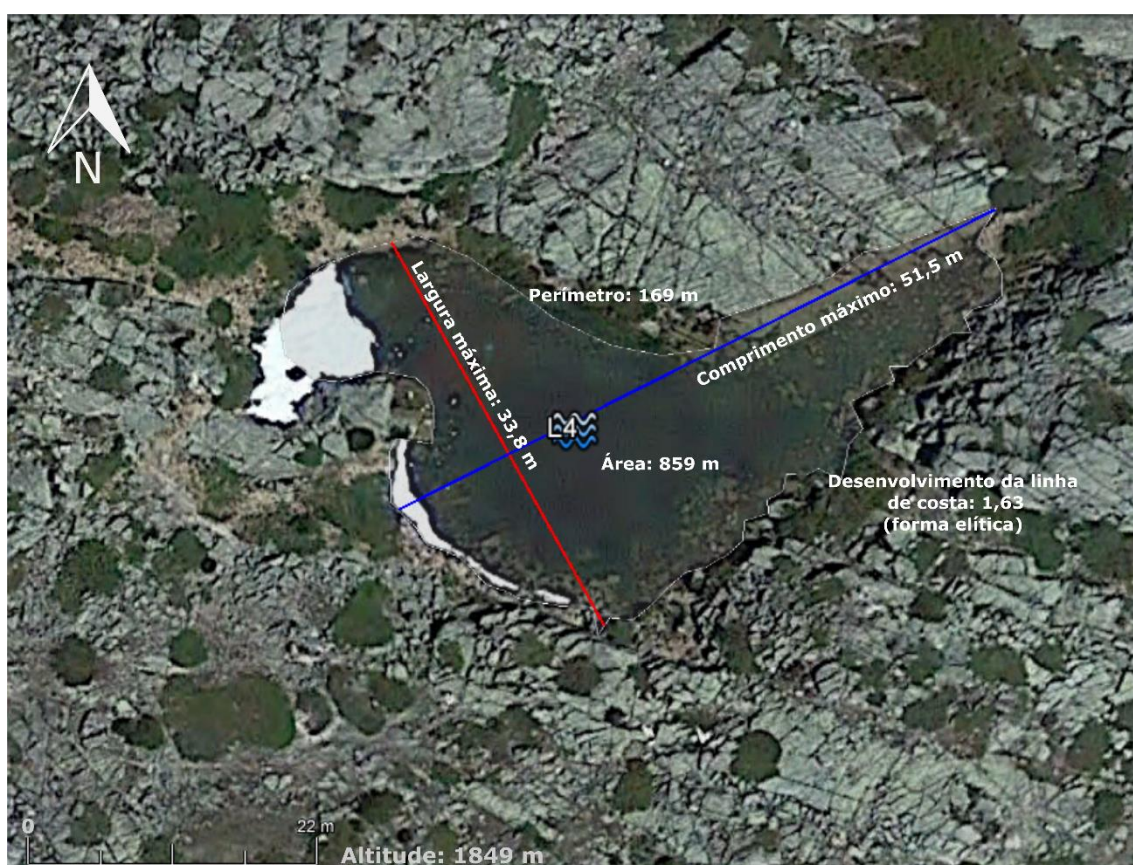


Figura 4.11 – Mapa da lagoa L4 com as medições realizadas através do Google Earth Pro.



Figura 4.12 – Aspeto da lagoa L4 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L5

A Figura 4.13 apresenta as medições realizadas na lagoa L5, as quais se encontram reunidas na Tabela 4.1. Esta lagoa apresenta dimensões muito reduzidas e está situada perto do “Covão da Alva” (ver Fig. 4.1). A lagoa não apresenta bacia hidrográfica associada, a água tem origem na precipitação e as perdas de água que poderão ocorrer são devidas em grande medida à evaporação e, em menor medida à infiltração. Um reduzido volume poderá escoar-se por uma pequena saída de água superficial, a nordeste, caso a lagoa se encontre no nível máximo. Esta lagoa está situada num fundo de vale e a sua profundidade máxima é inferior a 1 metro (Fig. 4.14).



Figura 4.13 – Mapa da lagoa L5 com as medições realizadas através do Google Earth Pro

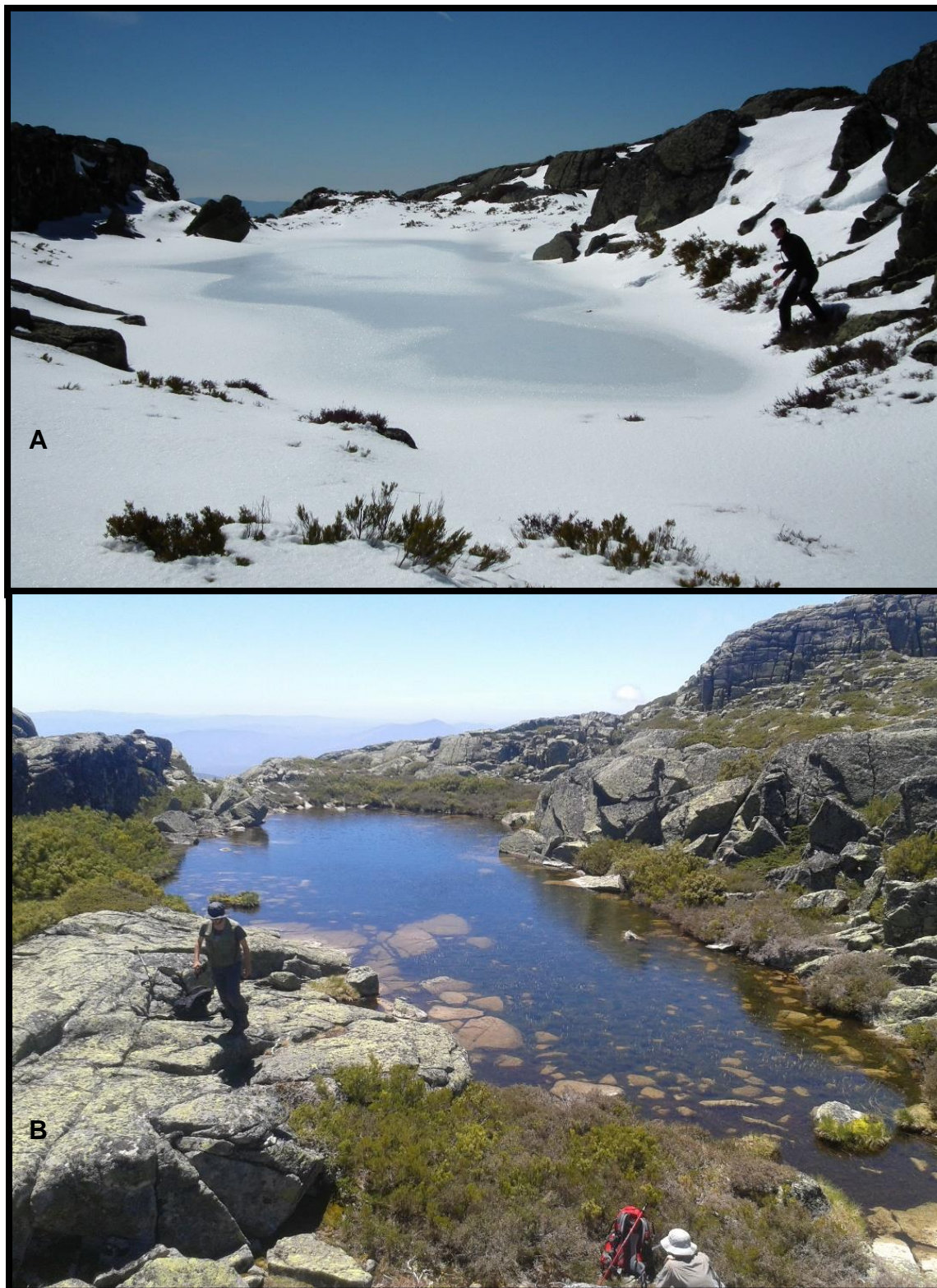


Figura 4.14 – Aspeto da lagoa L5 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L6

As medições relativas à lagoa L6 estão presentes na Figura 4.15 e na Tabela 4.1. Esta lagoa encontra-se parcialmente colmatada por sedimentos, tendo uma bacia hidrográfica de 1 240 000 m² (Torres 2015), com água proveniente de várias entradas de água superficial e com apenas uma saída de água superficial (Fig.4.16). A água entra, também através de precipitação e do escoamento subterrâneo e sai por evapotranspiração. A lagoa encontra-se num fundo de vale correspondendo a um antigo circo glaciário, não apresentando uma profundidade superior a 1 metro (Fig. 4.17).

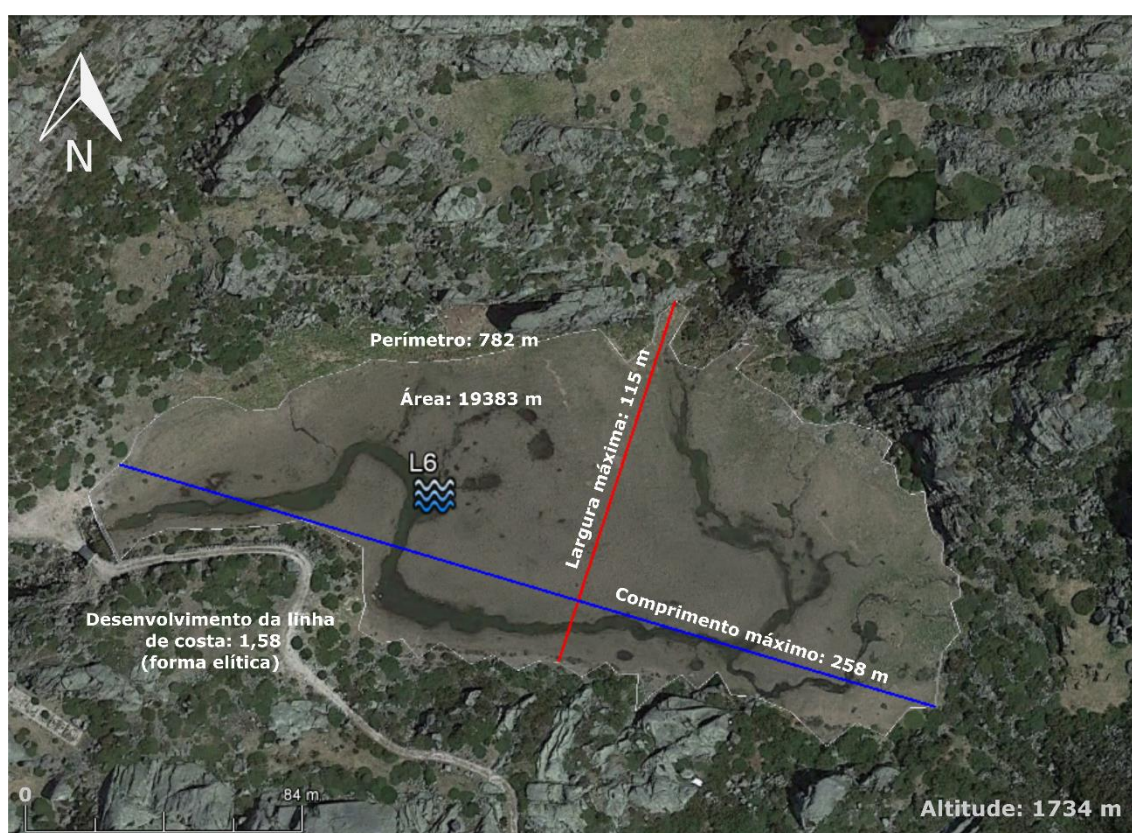


Figura 4.15 – Mapa da lagoa L6 com as medições realizadas através do Google Earth Pro

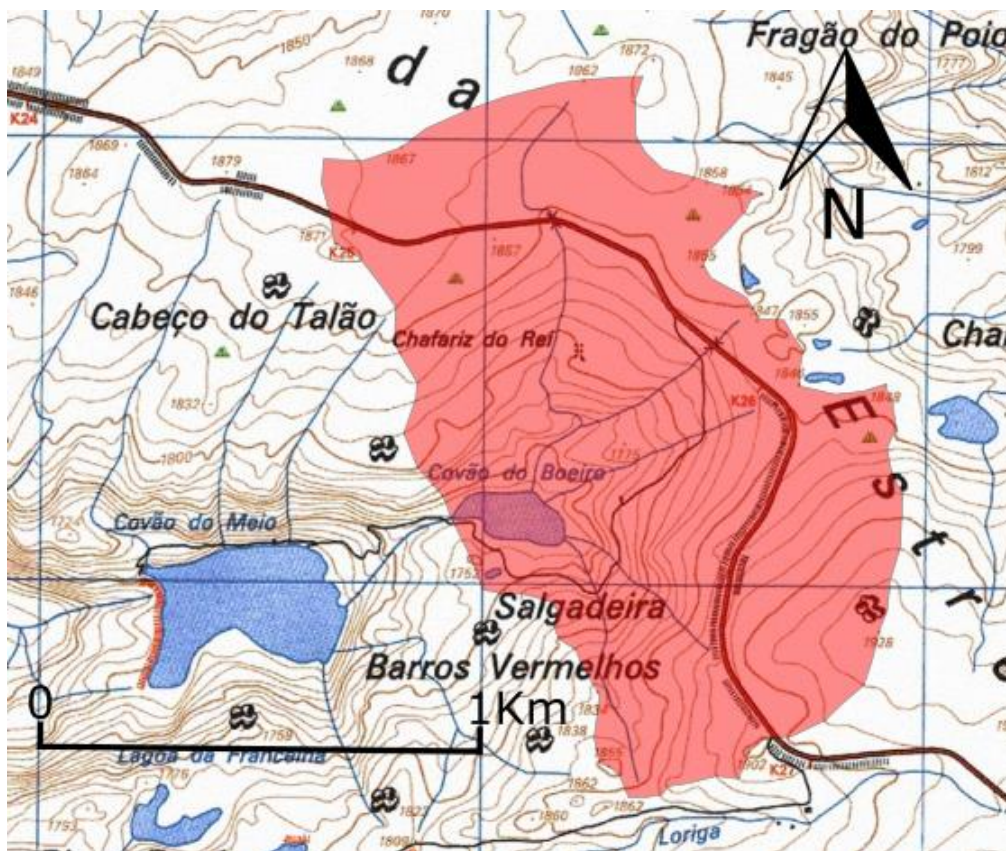


Figura 4.16 – Representação da bacia hidrográfica da lagoa L6 na carta militar nº 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 (Torres 2015).

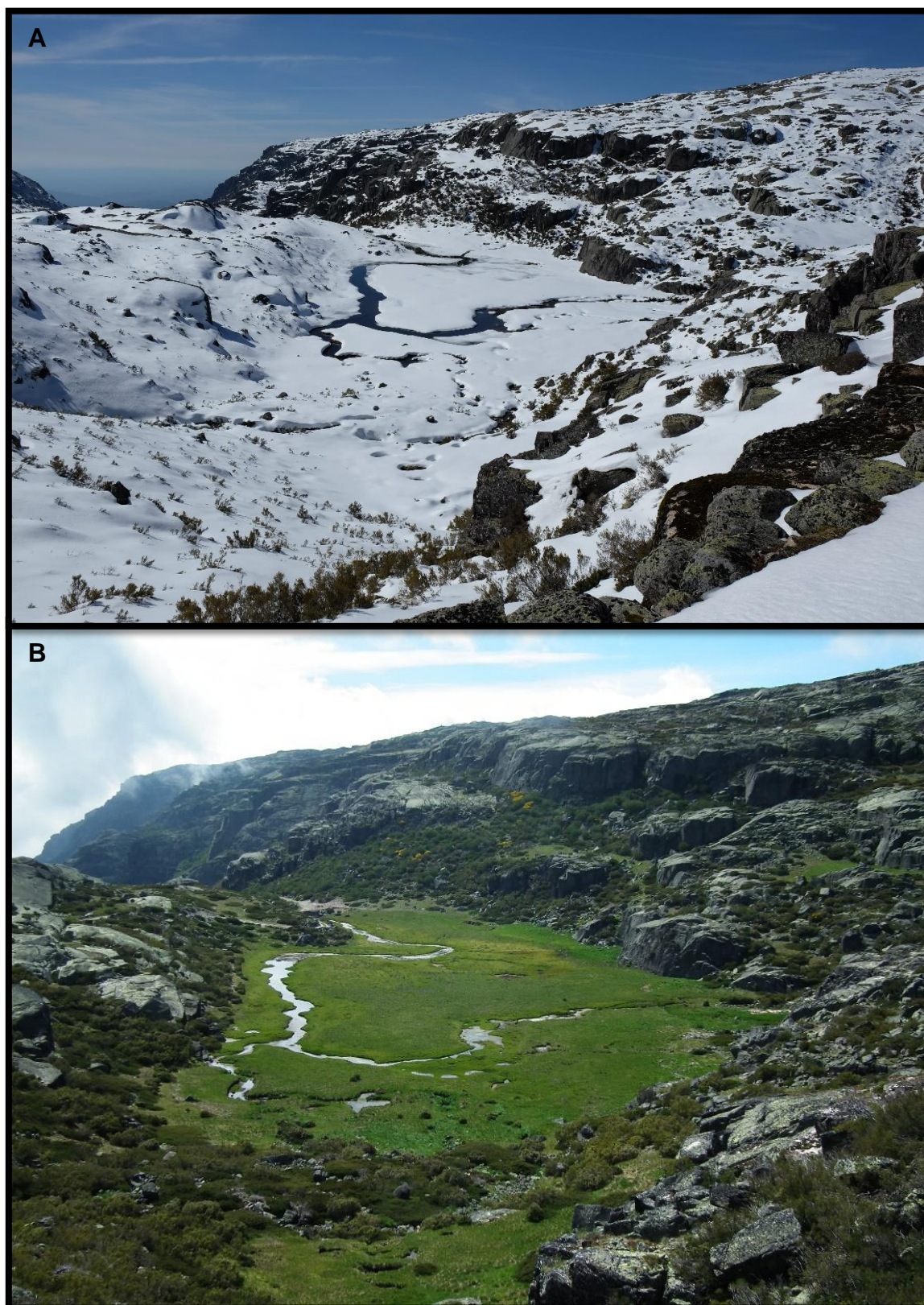


Figura 4.17 – Aspeto da lagoa L6 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

LAGOA L7

Na Figura 4.18 está presente o mapa com as medições realizadas na Lagoa L7, e que se encontram reunidas na Tabela 4.1. Esta lagoa não apresenta nenhuma entrada de água superficial. A entrada de água apenas ocorre pela precipitação, em forma de chuva ou neve. Relativamente à saída de água, esta ocorre sobretudo pela evaporação e uma reduzida parte poderá sair por uma pequena saída de água superficial, a nordeste, em direção à lagoa L6, caso a lagoa L7 se encontre no nível máximo. A lagoa encontra-se numa depressão cavada na rocha, numa zona de fundo de vale, com profundidade entre 1 a 2 metros (Fig. 4.19).



Figura 4.18 – Mapa da lagoa L7 com as medições realizadas através do Google Earth Pro.

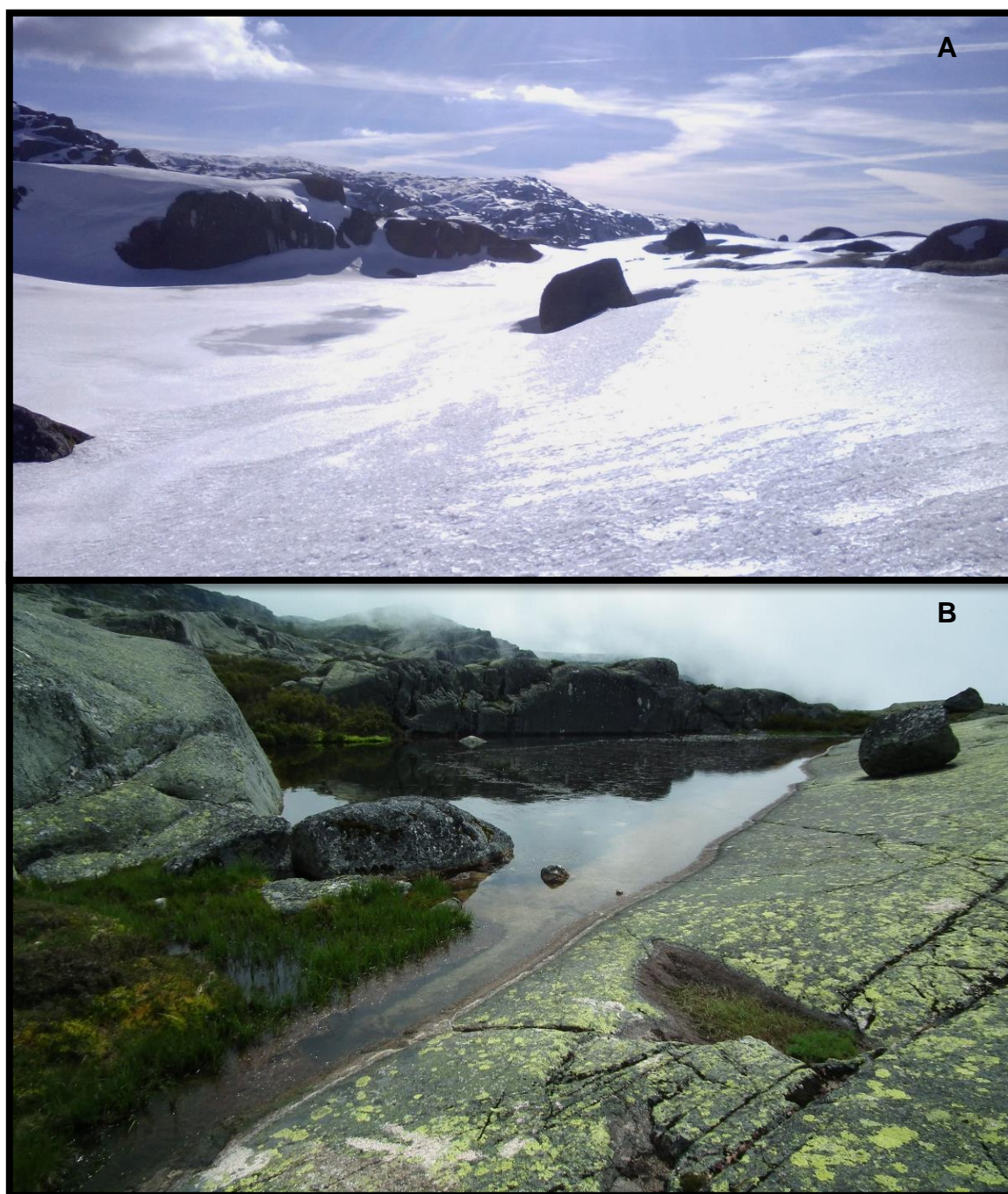


Figura 4.19 – Aspeto da lagoa L7 no inverno – março 2016 (A) e na primavera – junho 2016 (B).

A Tabela 4.1 reúne todas as medições efetuadas para cada uma das sete lagoas. É possível verificar que a lagoa L1 se encontra a uma cota mais baixa, sendo que a lagoa L5 é a que apresenta uma altitude maior. Relativamente à área, a maior lagoa é a L6 e a menor a L5. Quanto ao comprimento máximo, este é maior na lagoa L6 e menor na L5, enquanto que a largura máxima é maior na lagoa L3 e menor na L5. Portanto é de esperar, obviamente que o perímetro da lagoa L5 seja o menor, como é confirmado e o perímetro da lagoa L6 seja o maior. A maior parte das lagoas é considerada como elítica, verificando-se apenas uma lagoa de forma alongada (L5).

Tabela 4.1 – Características morfométricas das lagoas estudadas.

Lagoas	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	Média	Desvio Padrão
Altitude (m)	1645	1822	1834	1849	1854	1734	1749	1784	78
Comprimento – l (m)	130,0	76,9	167,0	51,5	34,2	258,0	62,8	111,5	79,6
Largura – b _x (m)	35,0	40,0	125,0	33,8	11,8	115,0	25,0	55,1	45,4
Área – A (m ²)	3463	2016	11781	859	242	19383	903	5521	7289
Largura média – b (m)	26,6	26,2	70,5	16,7	7,1	75,1	14,4	33,8	27,5
Linha de costa – L (m)	324	211	694	169	123	782	155	351	273
Desenvolvimento da linha de costa – D _L	1,55 Lago de forma elítica	1,33 Lagoa de forma subcircular a elítica	1,80 Lagoa de forma elítica a alongada	1,63 Lagoa de forma elítica	2,23 Lagoa de forma alongada	1,58 Lagoa de forma elítica	1,46 Lagoa de forma elítica	1,65	0,29
Área da bacia hidrográfica (m ²)	-	-	180 000	-	-	1 240 000	-	-	-

4.3. MODELO HIDROLÓGICO CONCEPTUAL

Os modelos conceptuais, por norma, são representações simplificadas da realidade, para facilitar a sua aplicação prática, mas que devem ter limitações de modo a assegurar o rigor da representação (Espinha Marques 2007).

Um modelo conceptual pode ser traduzido como uma idealização mental que resulta da interpretação da informação disponível em determinado momento (Espinha Marques 2007).

O modelo de um sistema natural é, por definição, uma representação formal e simplificada de uma dada realidade. A elaboração de um modelo hidrológico conceptual preliminar é uma das primeiras fases da modelação e poderá ser expresso por ideias, palavras e valores numéricos, constituindo o fundamento da modelação matemática subsequente (NAP 2001), sendo a qualidade dos resultados obtidos dependente da qualidade do modelo conceptual preliminar adotado (Espinha Marques *et al.* 2006, Espinha Marques 2007).

O processo de conceptualização implica a compreensão da natureza do sistema hidrológico, as suas características genéricas (tais como o relevo, a variabilidade espacial dos parâmetros hidrológicos, a hidrogeoquímica, as características geológicas dos limites do sistema, etc.) e os processos físicos e químicos envolvidos. O modelo conceptual é consequência da perceção do investigador em relação ao funcionamento do sistema, a qual vai depender largamente da sua experiência, com destaque para a de campo (Espinha Marques *et al.* 2006).

O modelo preliminar vai ser certamente limitado, pois a informação na fase em que é elaborado é escassa e, portanto, o modelo vai passando por processos de aperfeiçoamento à medida que a informação é adquirida, levando a um maior conhecimento do sistema hidrogeológico (Espinha Marques 2007).

No caso das lagoas da Serra da Estrela, o modelo hidrológico conceptual resultou das observações de campo, da análise da fotografia de satélite e de pesquisa bibliográfica. O seu propósito foi representar o funcionamento hidrológico das lagoas, nomeadamente os fluxos de entrada e saída de água bem como a eventual interação das lagoas com o aquífero e com a rede de drenagem superficial, tal como foi descrito no subcapítulo anterior para cada uma das lagoas.

Foi realizado o modelo hidrológico conceptual para as lagoas em duas perspetivas, uma segundo a representação cartográfica (Fig. 4.20 e 4.21) e outra em perfil. Foram definidos os seguintes tipos de modelo hidrológico conceptual:

- Tipo I: lagoas sem entrada de água através da rede de drenagem superficial, ou seja sem bacia hidrográfica. O fundo da lagoa está acima da superfície freática. Dada a reduzida permeabilidade do substrato rochoso, a ligação ao aquífero livre, por infiltração é escassa. A água entra através da precipitação da chuva e neve (Fig. 4.22). A saída de água através da rede de drenagem é inexistente ou temporária e com caudal reduzido ($< 1 \text{ L/s}$). Estas lagoas localizam-se em portelas. Neste modelo enquadram-se as lagoas L1, L4, L5 e L7;
- Tipo II: lagoas sem entrada de água através da rede de drenagem superficial, ou seja, sem bacia hidrográfica. O fundo da lagoa está, pelo menos parte do ano, abaixo da superfície freática. A água entra através da precipitação da chuva e neve, assim como do escoamento subterrâneo (Fig. 4.23). A saída de água através da rede de drenagem é inexistente ou temporária e com caudal reduzido ($< 1 \text{ L/s}$). A forma do fluxo de alimentação pelo escoamento subterrâneo depende da posição topográfica da lagoa: fundo de vale ou encosta. Neste modelo enquadra-se a lagoa L2;
- Tipo III: lagoas com entrada de água através da rede de drenagem superficial, ou seja, com bacia hidrográfica. O fundo da lagoa está, normalmente, abaixo da superfície freática. A água entra através da precipitação da chuva e neve, assim como do escoamento subterrâneo (Fig. 4.24). A forma do fluxo de alimentação pelo escoamento subterrâneo é determinado pela posição topográfica da lagoa: fundo de vale. Neste modelo enquadram-se as lagoas L3 e L6.

De acordo com os três tipos de modelos hidrológicos conceptuais definidos, é possível verificar que as lagoas L1, L2, L4, L5 e L7 (modelos Tipo I e II) se enquadram na representação do modelo da Figura 4.20, ou seja, não apresentam entradas nem saídas de água através da rede de drenagem superficial. Já as lagoas L3 e L6 (modelo Tipo III) enquadram-se na representação do modelo da Figura 4.21, exibindo entradas e saídas de águas por intermédio da rede de drenagem superficial.

Relativamente à perspetiva em perfil, a Figura 4.22 mostra a entrada de água através da precipitação em forma de chuva e neve e, a saída de água através da evaporação, podendo uma pequena parte infiltrar-se na zona não saturada. Pode ainda ocorrer saída de água através do escoamento superficial, por curtos períodos, quando a lagoa se

encontra no seu nível máximo. Nesta representação do modelo hidrológico conceptual, definido anteriormente como Tipo I, encontram-se as lagoas L1, L4, L5 e L7.

A representação em perfil, do modelo hidrológico conceptual do Tipo II, encontra-se na Figura 4.23, onde é exemplo a lagoa L2. Aqui verifica-se a entrada de água através da precipitação, mas também através do escoamento subterrâneo. A lagoa é ainda alimentada através do fluxo do aquífero livre. A saída de água ocorre através da evaporação e também através do fluxo no aquífero livre, uma vez que a lagoa se encontra numa zona de encosta e o fundo da lagoa se encontra abaixo da superfície freática.

Por último, o modelo hidrológico conceptual do Tipo III encontra-se representado em perspectiva de perfil na Figura 4.24. A entrada de água ocorre através da rede de drenagem superficial e da precipitação. A superfície freática encontra-se acima do nível da lagoa de modo que o aquífero também contribui para o abastecimento da lagoa. A saída de água, para além de ocorrer através da evaporação, ocorre também através da rede de drenagem superficial. Neste modelo enquadram-se as lagoas L3 e L6.

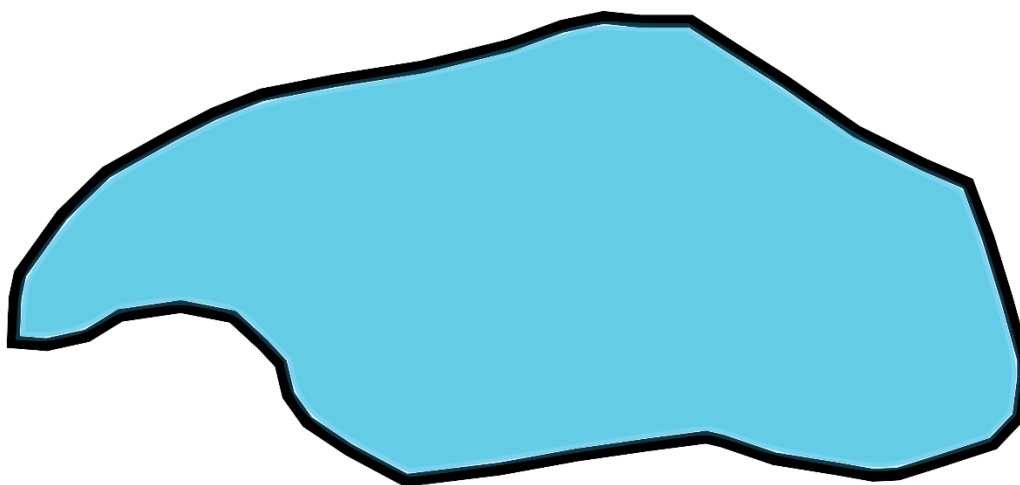


Figura 4.20 – Modelo hidrológico conceptual tipo I e II, representando as lagoas L1 L2, L4, L5 e L7 em perspectiva cartográfica.



Figura 4.21 – Modelo hidrológico conceptual tipo III, representando as lagoas L3 e L6 em perspetiva cartográfica.

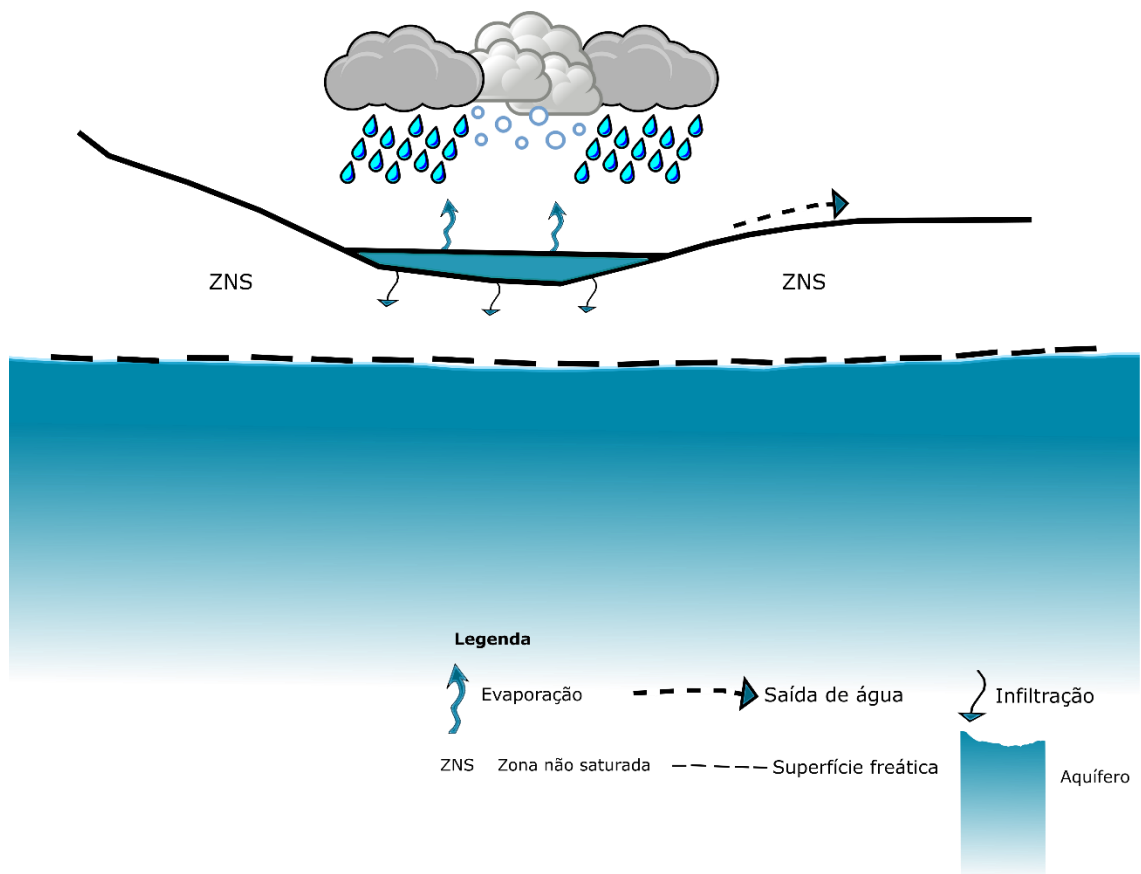


Figura 4.22 – Modelo hidrológico conceptual tipo I, representando as lagoas L1, L4, L5 e L7 em perspetiva de perfil.

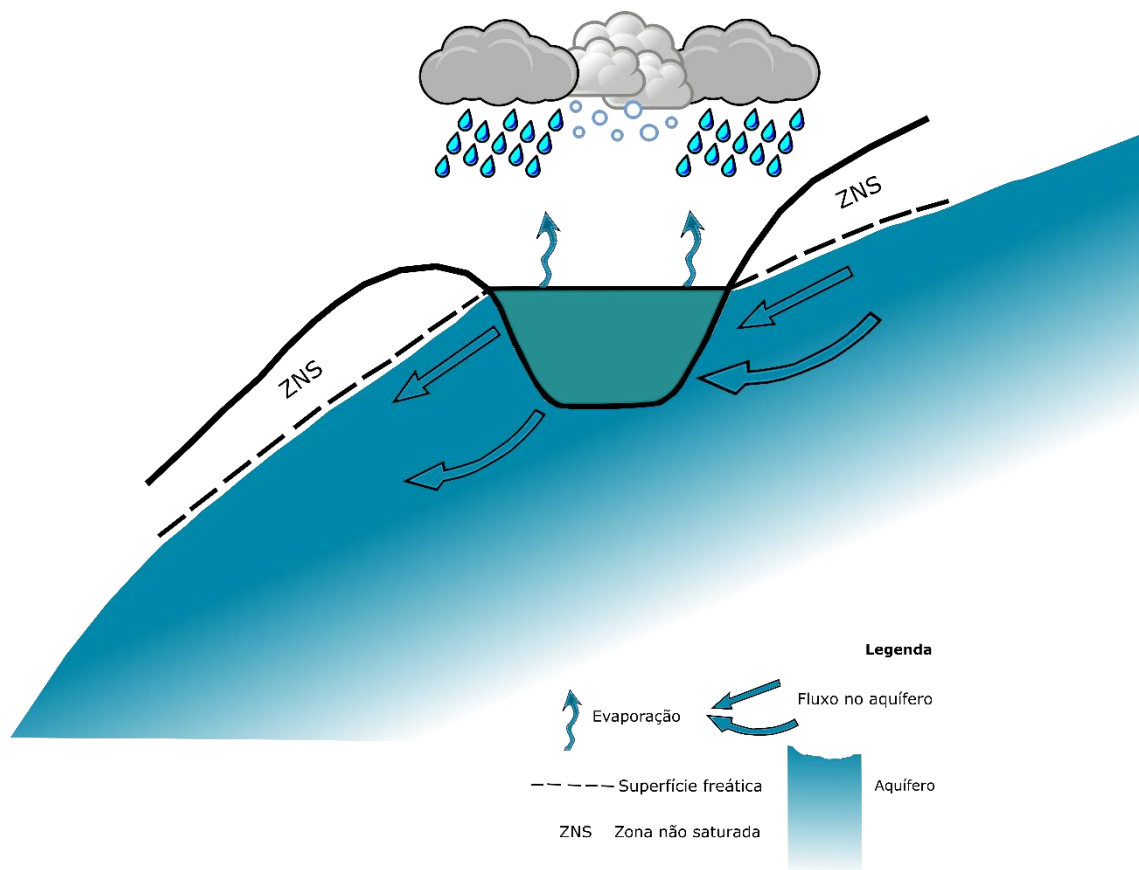


Figura 4.23 – Modelo hidrológico conceptual tipo II, representando a lagoa L2, num corte esquemático segundo a linha de maior declive.

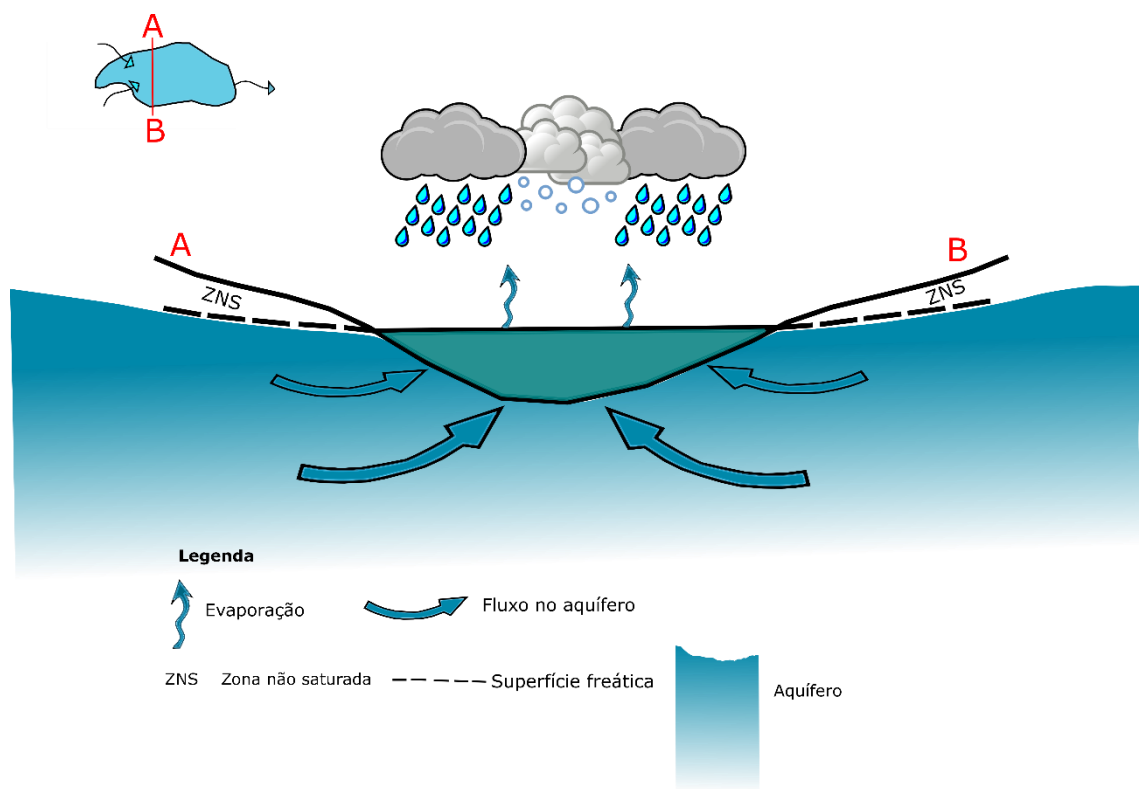


Figura 4.24 – Modelo hidrológico conceptual tipo III, representando as lagoas L3 e L6, num corte segundo AB.

5. HIDROGEOQUÍMICA

A compreensão do funcionamento dos sistemas hidrogeológicos está em grande parte relacionada com o estudo dos fenómenos hidrogeoquímicos (Freeze & Cherry 1979), pois este tipo de estudos pode fornecer informações relacionadas com parâmetros constituintes de um sistema hidrogeológico, como são exemplo: os processos de recarga dos aquíferos, a interação química entre as rochas e as águas, transporte de massa ou relações hidráulicas entre aquíferos ou entre estes e os reservatórios de água superficial (Espinha Marques 2007).

A hidrogeoquímica é também uma ferramenta fundamental na identificação de fontes de poluição naturais ou antrópicas, através do estudo da variabilidade espacial e temporal de uma ou mais espécies químicas presentes na água.

Os resultados hidrogeoquímicos contribuíram para se aprofundar o conhecimento de aspetos do ciclo hidrológico local, da interação entre águas superficiais e subterrâneas, da evolução geoquímica das águas e da influência antrópica.

O estudo hidrogeoquímico abrangeu as lagoas descritas no capítulo 4 no que respeita à sua caracterização hidrológica. Foi realizada *in situ* a medição do pH, condutividade elétrica e temperatura da água (Fig. 5.1) e ainda realizadas campanhas de amostragem para análise laboratorial (Fig. 5.2).



Figura 5.1 – Medição *in situ* do pH, condutividade elétrica e temperatura da água na lagoa L1.



Figura 5.2 – Amostragem de água para análise química na lagoa L6.

5.1 HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS DAS LAGOAS DA SERRA DA ESTRELA

O estudo hidrogeoquímico baseou-se nas seguintes determinações em amostras de água recolhidas em cada lagoa em campanhas realizadas em janeiro, março e junho de 2016:

- Parâmetros físico-químicos (medidos *in situ* com recurso a um medidor portátil em recipiente apropriado): pH, condutividade elétrica e temperatura (Fig. 5.3);
- Iões maioritários (determinados laboratorialmente): sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), hidrogenocarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) e cloreto (Cl^-).

As amostras de água para envio ao laboratório devem ser representativas das condições *in situ* e assim sendo para a recolha da amostra foi utilizado um amostrador que permitiu recolher água desde a superfície até ao fundo de cada lagoa (Fig. 5.4).



Figura 5.3 – Medição do pH, condutividade elétrica e temperatura da água recolhida com auxílio do amostrador.



Figura 5.4 – Amostrador utilizado para recolha de água das lagoas.

5.1.1. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Na Tabela 5.1 encontra-se a totalidade dos valores medidos e nas Figuras 5.5 a 5.7 a representação da evolução temporal dos mesmos parâmetros para cada uma das lagoas.

Tabela 5.1 – Valores de temperatura, pH e condutividade elétrica da água das lagoas, medidos *in situ*.

Lagoas	Temperatura (°C)			pH			Condutividade Elétrica (μS/cm)		
	Janeiro	Março	Junho	Janeiro	Março	Junho	Janeiro	Março	Junho
L1	-	4,9	22	5,06	4,46	5,7	9,56	13,69	15,67
L2	3,9	-	15,7	5,18	-	5,93	7,3	-	11,91
L3	4,9	2,4	17,1	5,17	4,66	5,73	55,6	36,7	9,79
L4	4,2	1,5	16,8	4,66	4,77	5,66	13,93	21,4	5,61
L5	4,2	1,3	15,1	5,18	4,8	5,61	7,47	10,67	5,21
L6	3,6	5,3	18	5,42	4,8	5,54	91,1	147,9	91,8
L7	2,2	1,2	22,8	4,94	4,59	5,41	7,46	17,52	9,63

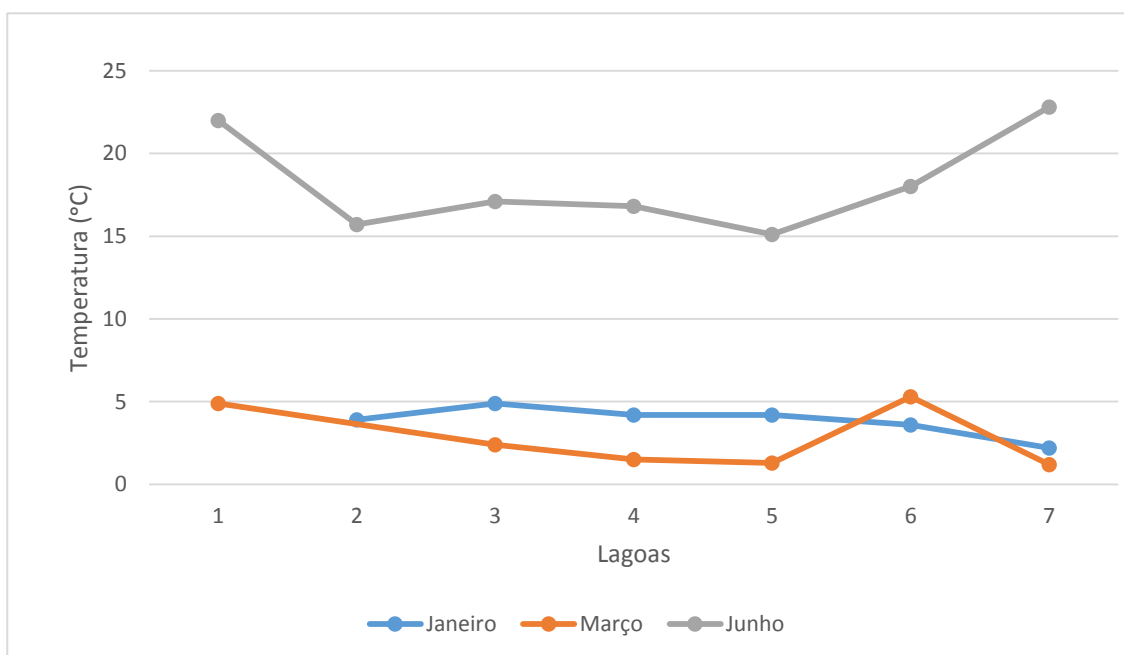


Figura 5.5 – Evolução temporal da temperatura da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

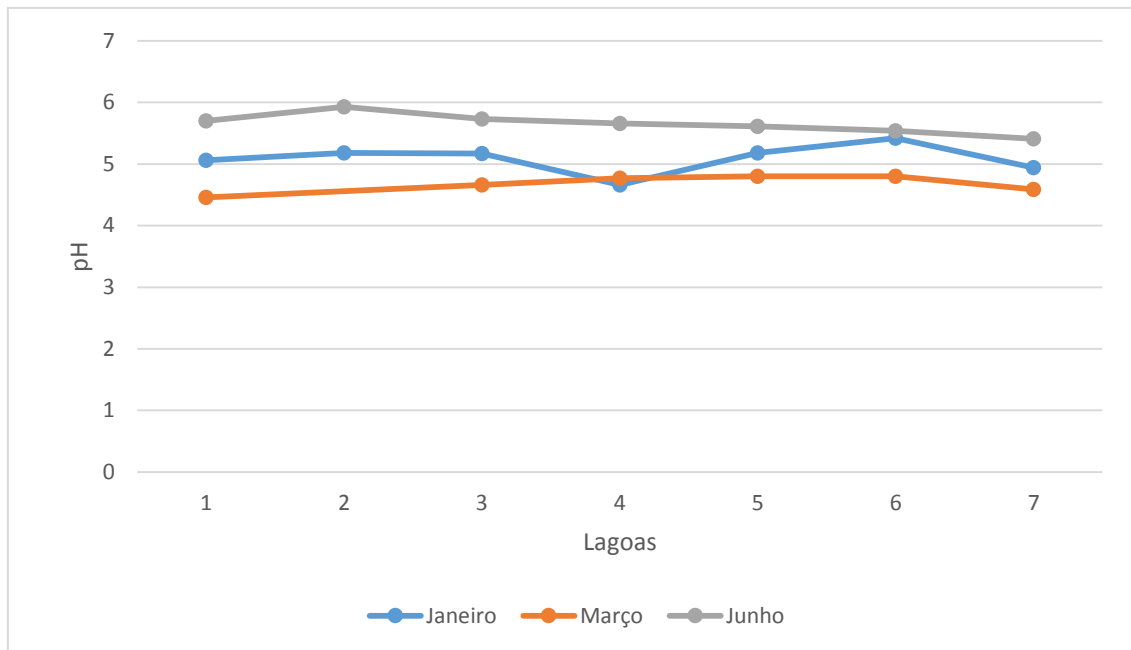


Figura 5.6 – Evolução temporal do pH da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

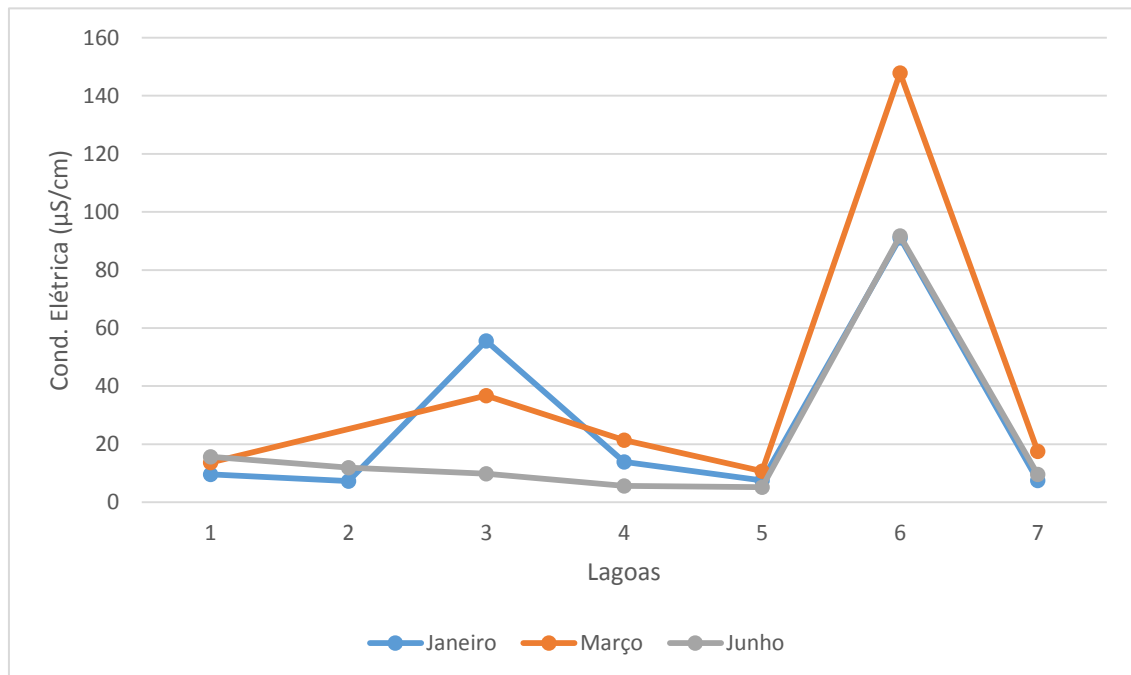


Figura 5.7 – Evolução temporal da condutividade elétrica da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

O valor da temperatura da água da lagoa L1, na campanha de janeiro não está apresentado devido a avaria do aparelho de medição. Os valores em falta na lagoa L2, na campanha de março, devem-se ao facto da lagoa se encontrar completamente congelada e não ter sido possível colher água.

Com base na Tabela 5.1 e na Figura 5.5 é possível verificar que a temperatura da água das lagoas acompanha a variação da temperatura do ar ao longo do ano. As temperaturas mais baixas são registadas no inverno (campanhas de janeiro e março) e as mais altas na primavera (junho). O facto de se verificar um decréscimo da temperatura das águas, da campanha de janeiro para março, é explicado pelo facto de que aquando a amostragem de março, as lagoas se encontravam completamente congeladas, pois tinha ocorrido um período de fortes nevões.

A temperatura mais baixa registada alcançou 1,2 °C e a mais alta não ultrapassa os 22,8 °C, ambas na mesma lagoa L7, na campanha de março e junho respetivamente.

Relativamente ao pH, este é em todos os casos inferior a 6 e superior a 4. O valor mais baixo é registado na lagoa L1 em março e o mais alto registado na lagoa L2 em junho. Ao observar o gráfico da Figura 5.6 verifica-se que há uma diminuição do pH na amostragem realizada em março, onde as temperaturas são mais baixas e, um aumento quando as temperaturas são mais altas em junho.

No que diz respeito à condutividade elétrica, os valores mais altos são registados em março, sendo as lagoas L3 e L6 as que apresentam condutividades elétricas mais elevadas (Fig. 5.7).

Na Tabela 5.2 estão presentes os teores dos iões maiores obtidos nas três campanhas (janeiro, março e junho de 2016).

Tabela 5.2 – Resultados dos teores dos iões maiores para as campanhas de janeiro, março e junho de 2016.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
Na⁺ (mg/L)	Janeiro	1,180	0,760	9,270	0,920	0,930	15,280	0,840
	Março	1,070	-	5,050	2,230	0,760	25,400	1,570
	Junho	1,720	1,340	2,050	1,360	1,390	16,620	1,380
Cl⁻ (mg/L)	Janeiro	1,980	1,380	16,640	2,430	1,500	28,150	1,220
	Março	2,480	-	9,540	4,730	2,080	45,440	2,220
	Junho	3,160	2,570	1,860	0,930	0,940	27,440	1,950
Ca²⁺ (mg/L)	Janeiro	0,220	0,160	0,630	0,140	0,150	1,530	0,009
	Março	1,090	-	1,180	1,250	0,970	3,310	0,940
	Junho	1,070	1,090	1,100	1,060	1,050	2,320	0,920
Mg²⁺ (mg/L)	Janeiro	0,090	0,060	0,070	0,050	0,060	0,180	0,030
	Março	0,120	-	0,070	0,260	0,090	0,360	0,160
	Junho	1,116	0,958	0,945	0,957	0,981	1,088	1,009
SO₄²⁻ (mg/L)	Janeiro	0,280	0,260	1,100	0,320	0,280	1,220	0,040
	Março	0,990	-	1,490	1,500	1,380	2,560	1,380
	Junho	0,260	1,240	0,720	0,690	0,540	1,540	1,190
HCO₃⁻ (mg/L)	Janeiro	4,900	3,700	3,700	2,400	2,400	3,700	2,400
	Março	2,600	-	2,600	2,400	2,100	1,600	1,800
	Junho	3,150	2,530	2,830	2,830	3,150	2,530	3,150
K⁺ (mg/L)	Janeiro	0,380	0,330	0,470	0,900	0,400	0,370	0,270
	Março	1,160	-	0,549	0,690	0,590	0,600	0,610
	Junho	3,330	2,910	1,370	0,960	0,880	1,470	1,880

Nota: Os valores da campanha de março para a lagoa L2 não estão presentes, pois não foi possível recolher água desta lagoa devido a ela se encontrar congelada.

Da análise da Tabela 5.2 e das Figuras 5.8 a 5.14 conclui-se o seguinte:

- de uma forma geral os teores mais elevados de Na⁺ são os relativos ao mês de março. Tanto a lagoa L3 como a L6 são as que apresentam os maiores valores nas três campanhas, a lagoa L6 em março, com 25,4 mg/L e a lagoa L3 em janeiro com 9,27 mg/L;
- os teores de Cl⁻ na generalidade são mais altos em março e mais baixos em junho. Também aqui é evidente que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam constantemente os resultados mais elevados, alcançando os 45,44 mg/L na lagoa L6 em março.
- os valores de Ca²⁺ mais baixos são registados em janeiro e os mais elevados em março. De uma forma geral, as lagoas L3 e L6 são as que apresentam

os teores mais altos, destacando-se a lagoa L6 em março com o valor mais elevado de 3,31 mg/L;

- os teores do ião Mg^{2+} aumentam ao longo das campanhas, verificando-se um grande aumento de março para junho, obtendo-se o valor mais elevado na lagoa L1 com 1,116 mg/L. De realçar também que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam constantemente os teores mais elevados;
- os valores de SO_4^{2-} são mais elevados em março e mais baixos em janeiro. Em geral as lagoas L3 e L6 apresentam os teores mais altos, destacando-se a lagoa L6 em março com 2,56 mg/L;
- de uma forma geral os valores de HCO_3^- são mais baixos em março e mais altos em janeiro, com destaque para o valor da lagoa L1 com 4,9 mg/L;
- os teores de K^+ apresentam um aumento gradual desde a primeira campanha, verificando-se o valor mais elevado na lagoa L1 em junho com 3,33 mg/L;

Todas estas variações nas lagoas são de origem natural, excetuando-se o caso das lagoas L3 e L6. O aumento generalizado dos iões nestas duas lagoas, em especial, no mês de março, poderá ser explicado pela entrada dos mesmos no sistema aquífero através da aplicação de sal para a limpeza das rodovias, ou seja por influência antrópica, uma vez que anteriormente tinham ocorrido fortes nevões.

É de notar que tanto a lagoa L3 como a L6, se destacam por apresentarem os teores de iões mais elevados, especialmente os de Na^+ e Cl^- (que são originados pelo NaCl, sal utilizado para o degelo das estradas) e os de Ca^{2+} (originados pelo $CaCl_2$, sal também utilizado no degelo das estradas), realçando o facto de as lagoas apresentarem rede de drenagem superficial o que faz com que os sais cheguem até elas (ver modelos hidrológicos conceptuais do capítulo 4, Figuras 4.21 e 4.24). As impurezas existentes no sal-gema utilizado para a limpeza das rodovias, podem justificar os elevados valores dos teores de Mg^{2+} e SO_4^{2-} , que igualmente se destacam.

Também por observação da Tabela 5.3, onde se encontram as médias dos iões maioritários e a sua soma para cada lagoa, é possível verificar que as lagoas L3 e L6 são as que contêm um valor mais elevado de iões. Reunindo os valores da soma dos iões com a condutividade elétrica – que apresenta valores mais elevados para as lagoas L3 e L6 (ver Tabela 5.1 e Figura 5.7), conclui-se que as lagoas L3 e L6 se encontram contaminadas por influência antrópica.

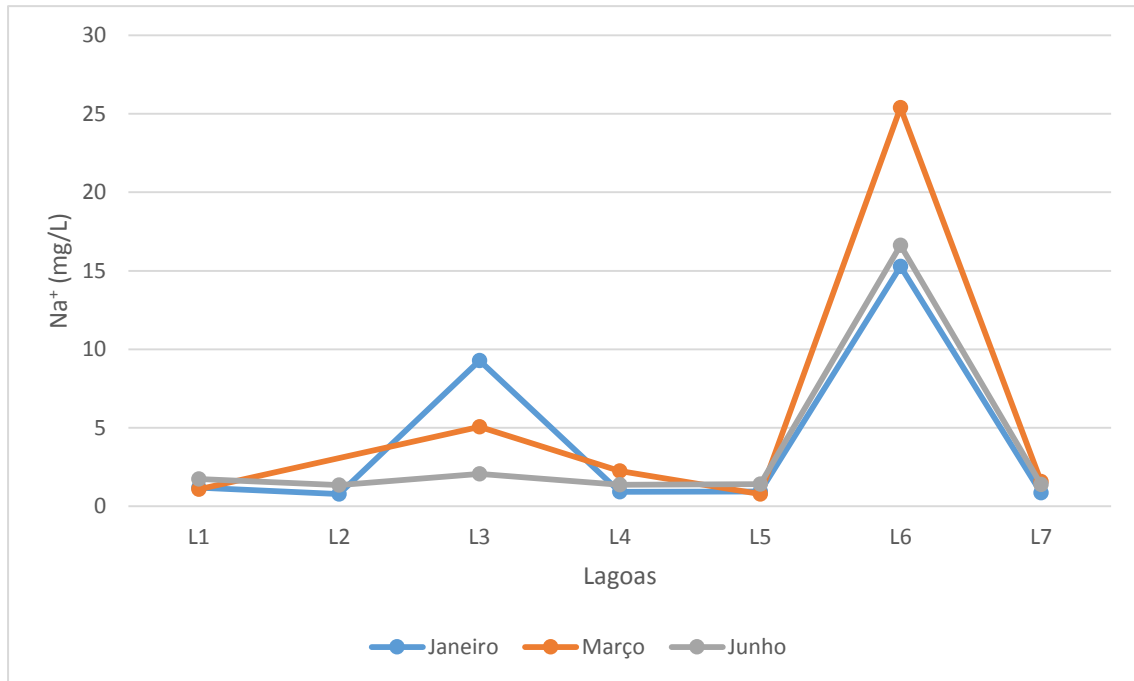


Figura 5.8 – Evolução temporal do catião Na^+ da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

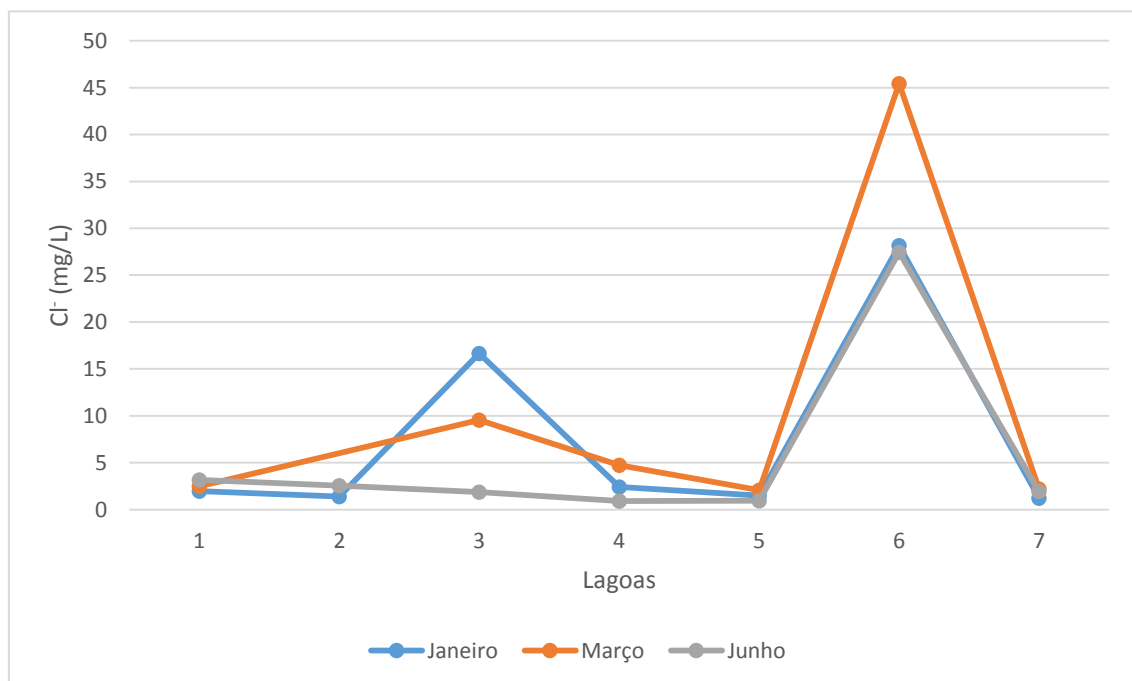


Figura 5.9 – Evolução temporal do anião Cl^- da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

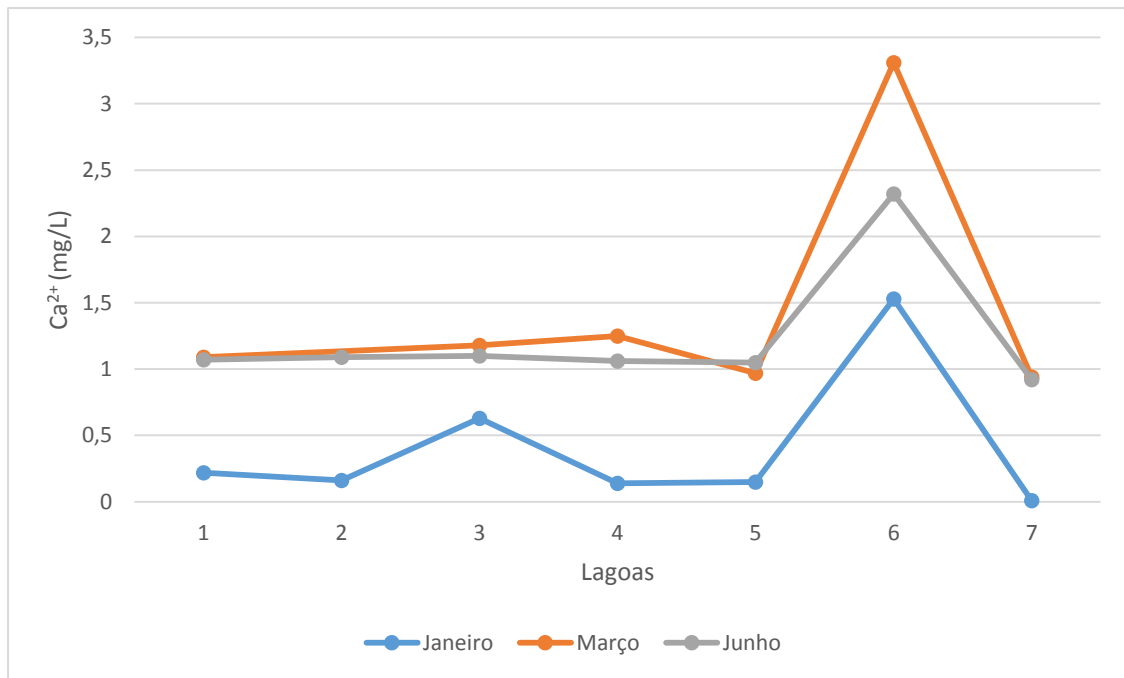


Figura 5.10 – Evolução temporal do catião Ca^{2+} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

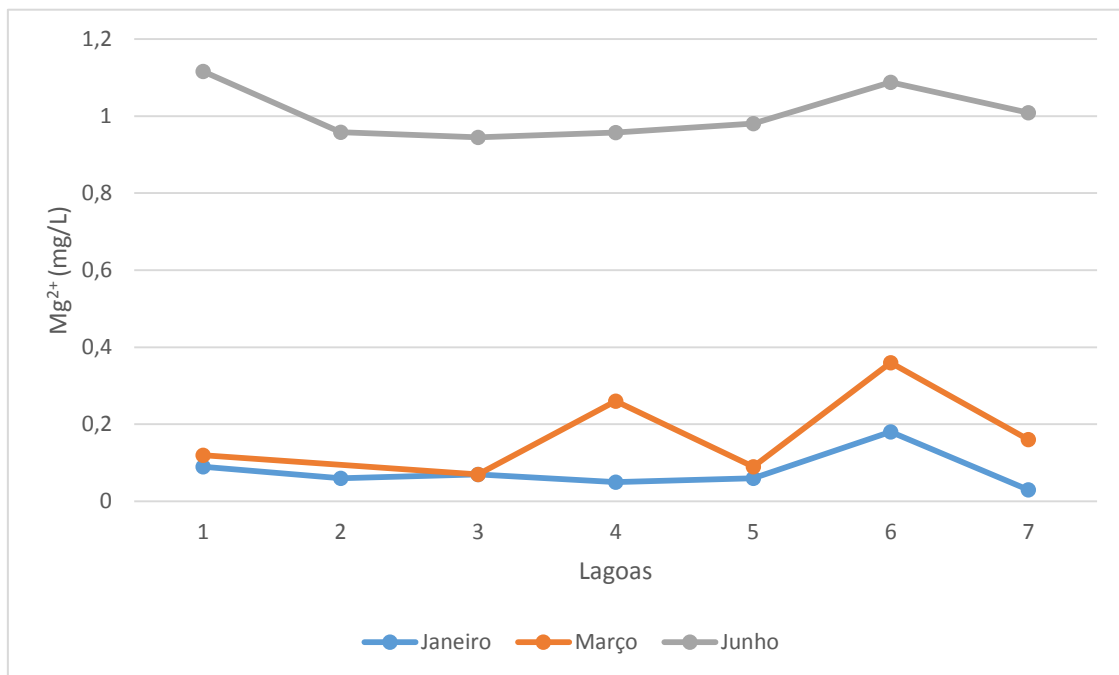


Figura 5.11 – Evolução temporal do catião Mg^{2+} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

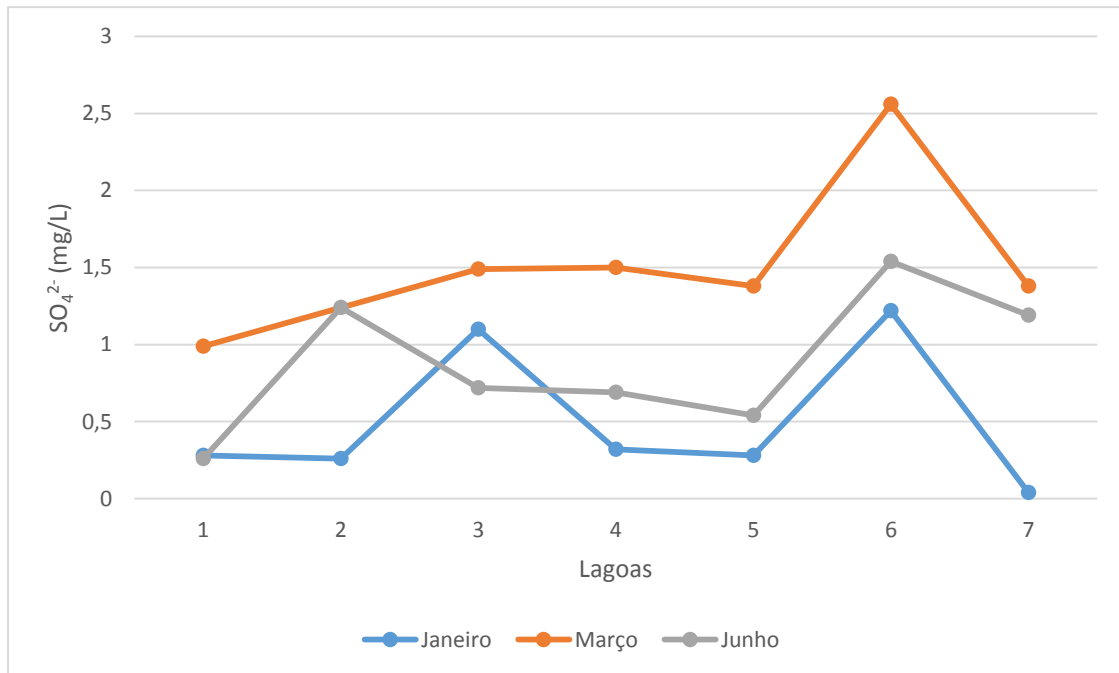


Figura 5.12 – Evolução temporal do anião SO_4^{2-} da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

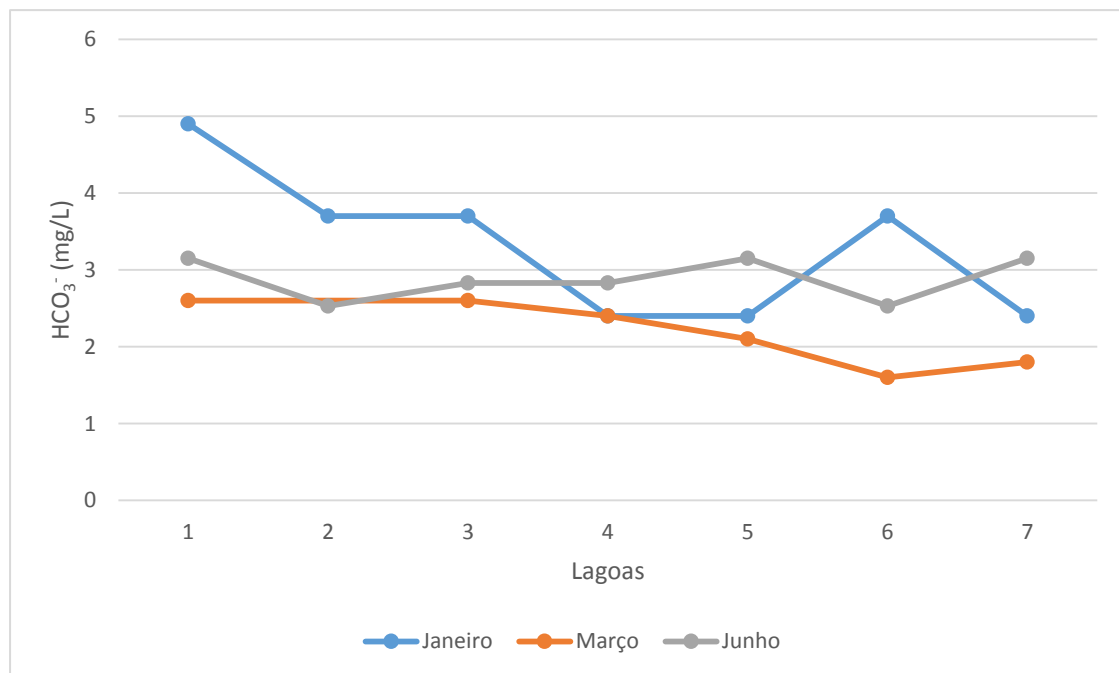


Figura 5.13 – Evolução temporal do anião HCO_3^- da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

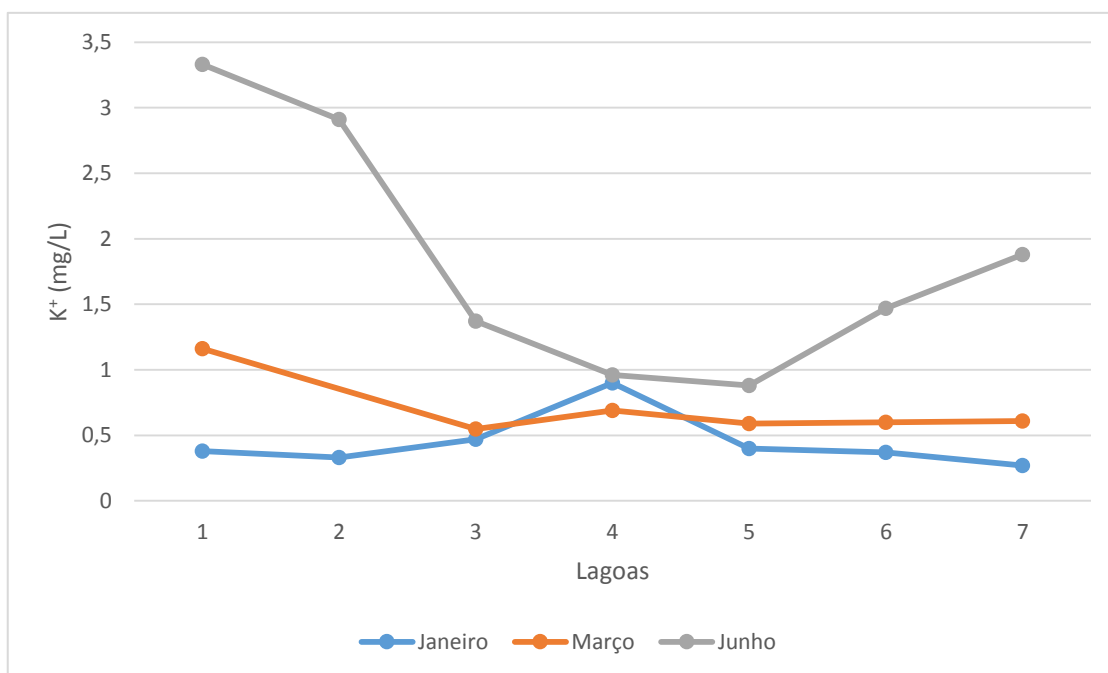


Figura 5.14 – Evolução temporal do catione K⁺ da água das lagoas em janeiro, março e junho de 2016.

Tabela 5.3 – Média dos teores dos iões maioritários para as campanhas de janeiro, março e junho de 2016.

Lagoas	Na ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Σ iões
L1	1,180	2,480	1,070	0,120	0,280	3,150	1,160	9,440
L2	1,050	1,975	0,625	0,509	0,750	3,115	1,620	9,644
L3	5,050	9,540	1,100	0,070	1,100	2,830	0,549	20,239
L4	1,360	2,430	1,060	0,260	0,690	2,400	0,900	9,100
L5	0,930	1,500	0,970	0,090	0,540	2,400	0,590	7,020
L6	16,620	28,150	2,320	0,360	1,540	2,530	0,600	52,120
L7	1,380	1,950	0,920	0,160	1,190	2,400	0,610	8,610

A Tabela 5.4 mostra a correlação entre os iões maiores, onde se evidencia a vermelho os valores das correlações mais relevantes. É possível verificar que existe uma forte correlação entre os iões Na⁺ e Ca²⁺, Na⁺ e SO₄²⁻, Ca²⁺ e Cl⁻ e SO₄²⁻ e Cl⁻ sendo a correlação mais elevada entre os iões Na⁺ e Cl⁻ (0,9990). Estas correlações comprovam que existe contaminação devido à limpeza da neve das estradas, pois os sais aplicados nas estradas são constituídos por NaCl e CaCl₂. A presença do SO₄²⁻ pode ser justificada pelas impurezas presentes no sal-gema.

Tabela 5.4 – Matriz de correlações entre teores de iões maioritários.

	Na ⁺	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺
Na ⁺	1,0000						
Cl ⁻	0,9990	1,0000					
Ca ²⁺	0,9560	0,9516	1,0000				
Mg ²⁺	0,2654	0,2539	0,1165	1,0000			
SO ₄ ²⁻	0,7629	0,7539	0,6359	0,2396	1,0000		
HCO ₃ ⁻	-0,1708	-0,1435	-0,2816	0,2334	-0,3916	1,0000	
K ⁺	-0,3817	-0,3767	-0,4682	0,6437	-0,4942	0,7318	1,0000

Os gráficos das Figuras 5.15 a 5.19 destacam os iões associados aos sais da limpeza da neve. Também através da observação dos gráficos se confirma que as correlações mais fortes são entre os iões Na⁺ e Cl⁻ (Fig. 5.15). Os gráficos suportam a ideia de que as lagoas L3 e L6 são as que se encontram contaminadas devido à aplicação dos sais para promover o degelo das estradas.

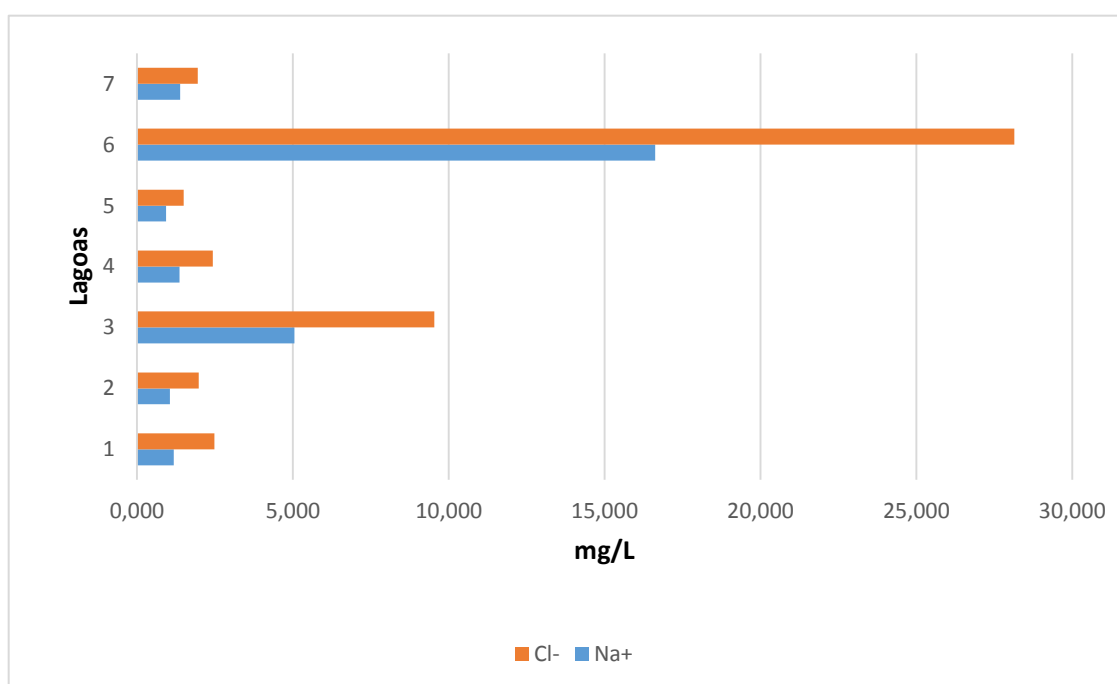


Figura 5.15 – Teores médios dos iões Cl⁻ e Na⁺ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.

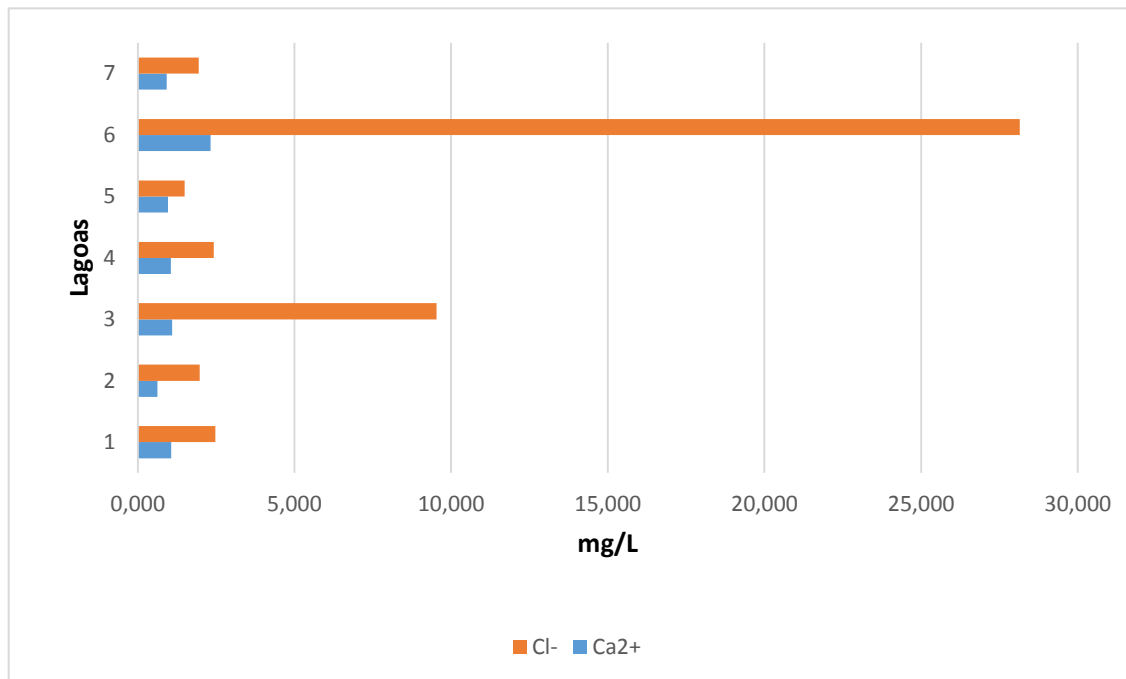


Figura 5.16 – Teores médios dos iões Cl^- e Ca^{2+} para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.

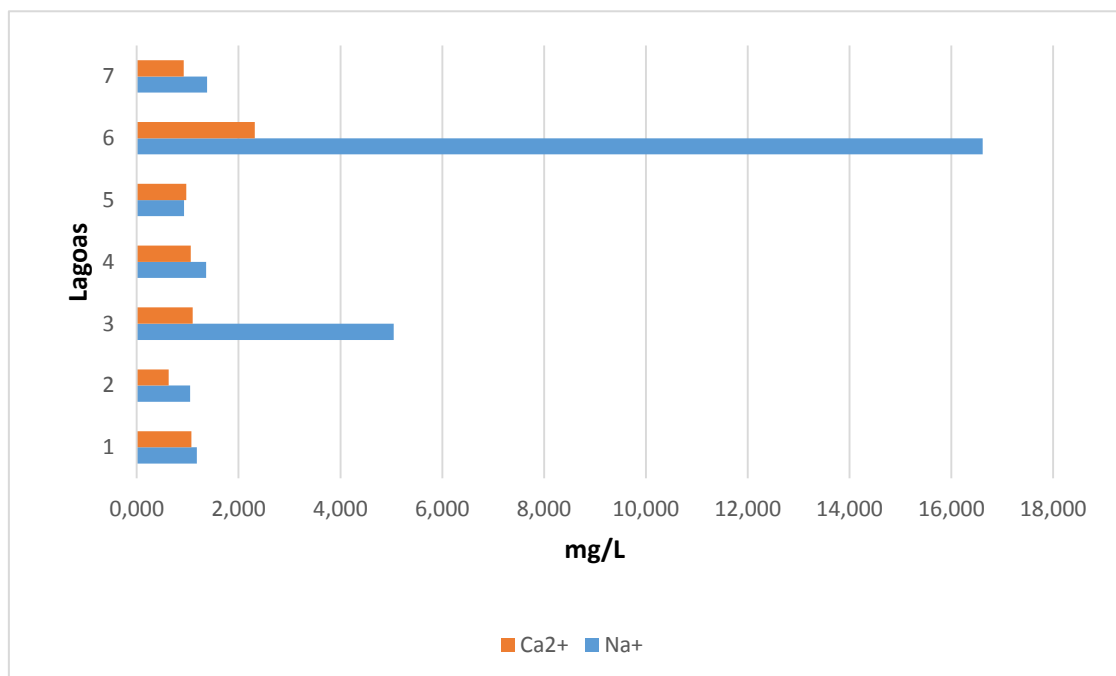


Figura 5.17 – Teores médios dos catiões Ca^{2+} e Na^+ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.

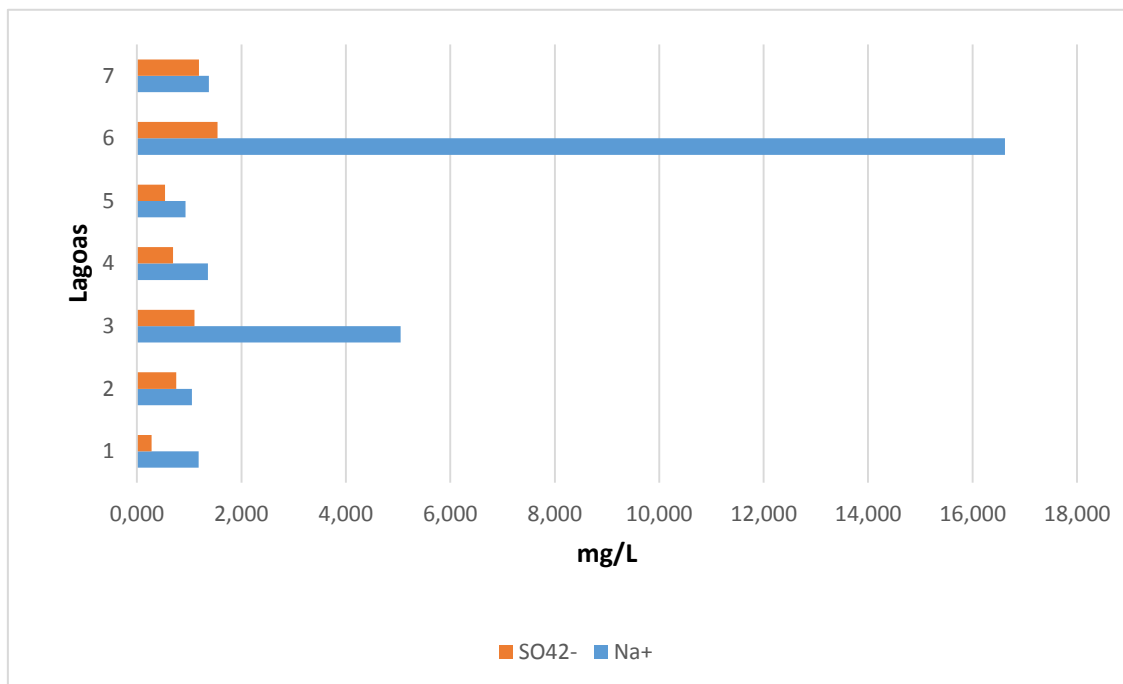


Figura 5.18 – Teores médios dos iões SO_4^{2-} e Na^+ para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.

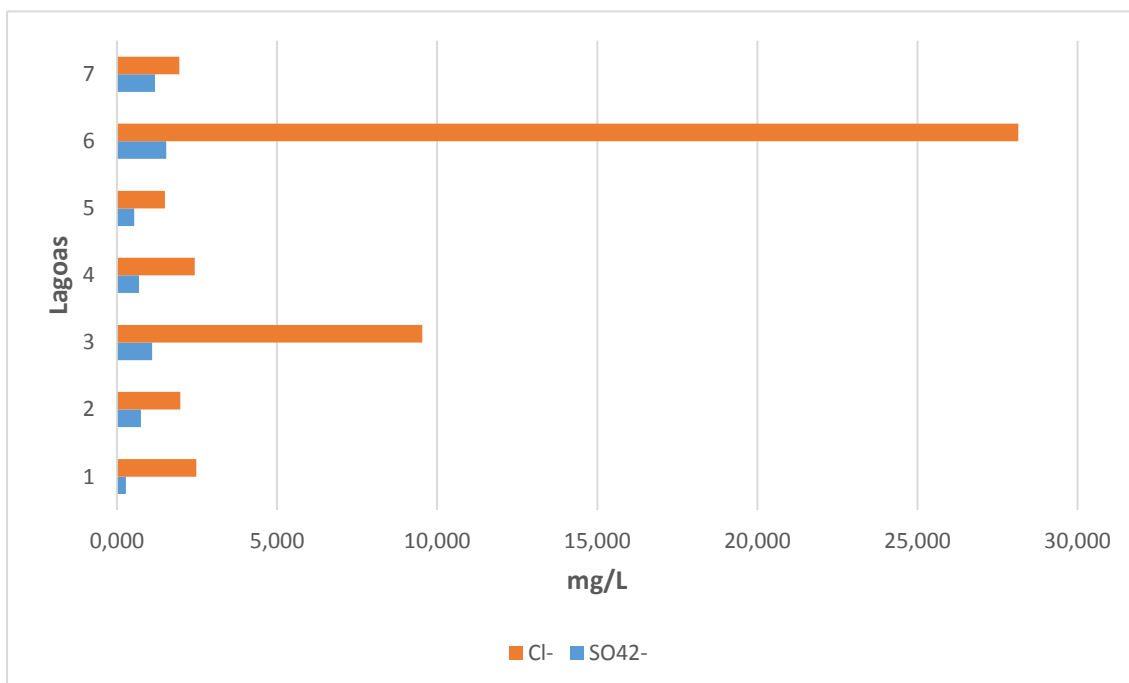


Figura 5.19 – Teores médios dos iões Cl^- e SO_4^{2-} para cada uma das lagoas, evidenciando que as lagoas L3 e L6 são as que apresentam os maiores teores.

5.1.2. FÁCIES HIDROGEOQUÍMICA

A hidrogeoquímica pode também ser estudada através de uma boa representação gráfica dos dados.

As análises químicas podem ser mais facilmente estudadas com a utilização de gráficos apropriados, principalmente quando se pretende fazer comparações entre várias análises de águas de um mesmo lugar em diferentes épocas ou de locais diferentes.

Com o emprego desses gráficos ou diagramas é possível colocar em evidência variações temporais ou espaciais, bem como mostrar relações entre iões de uma mesma amostra (Custodio & Llamas 2001).

Os diagramas de Piper, Durov e Stiff são um bom exemplo da aplicação visual dos dados.

As águas das lagoas da Serra da Estrela, apresentam, em geral, uma baixa mineralização, excetuando-se a lagoa L3 e L6, como se observa nos diagramas das Figuras 5.20 a 5.22.

Através do diagrama de Piper (Fig. 5.20) é possível inferir que as águas apresentam uma *fácies* hidrogeoquímica predominantemente cloretada-sódica. É também visível que as lagoas L3 e L6 (a vermelho) se encontram destacadas no diagrama indicando que têm uma forte influência dos iões Na^+ e Cl^- , como é de esperar, uma vez que se encontram contaminadas.

Também no diagrama de Durov (Fig. 5.21) é possível tirar as conclusões acima descritas. As lagoas L3 e L6 são as que apresentam uma maior mineralização, sendo que a lagoa L6 é a que apresenta um teor mais elevado. Também por este diagrama se conclui que as lagoas L3 e L6 se encontram contaminadas.

Mas é sobretudo nos diagramas de Stiff (Fig. 5.22) que se observa de forma bastante clara as diferenças entre as lagoas não contaminadas (polígonos a azul) e as lagoas contaminadas (polígonos a vermelho) pelo uso de sais para promover o degelo das estradas.

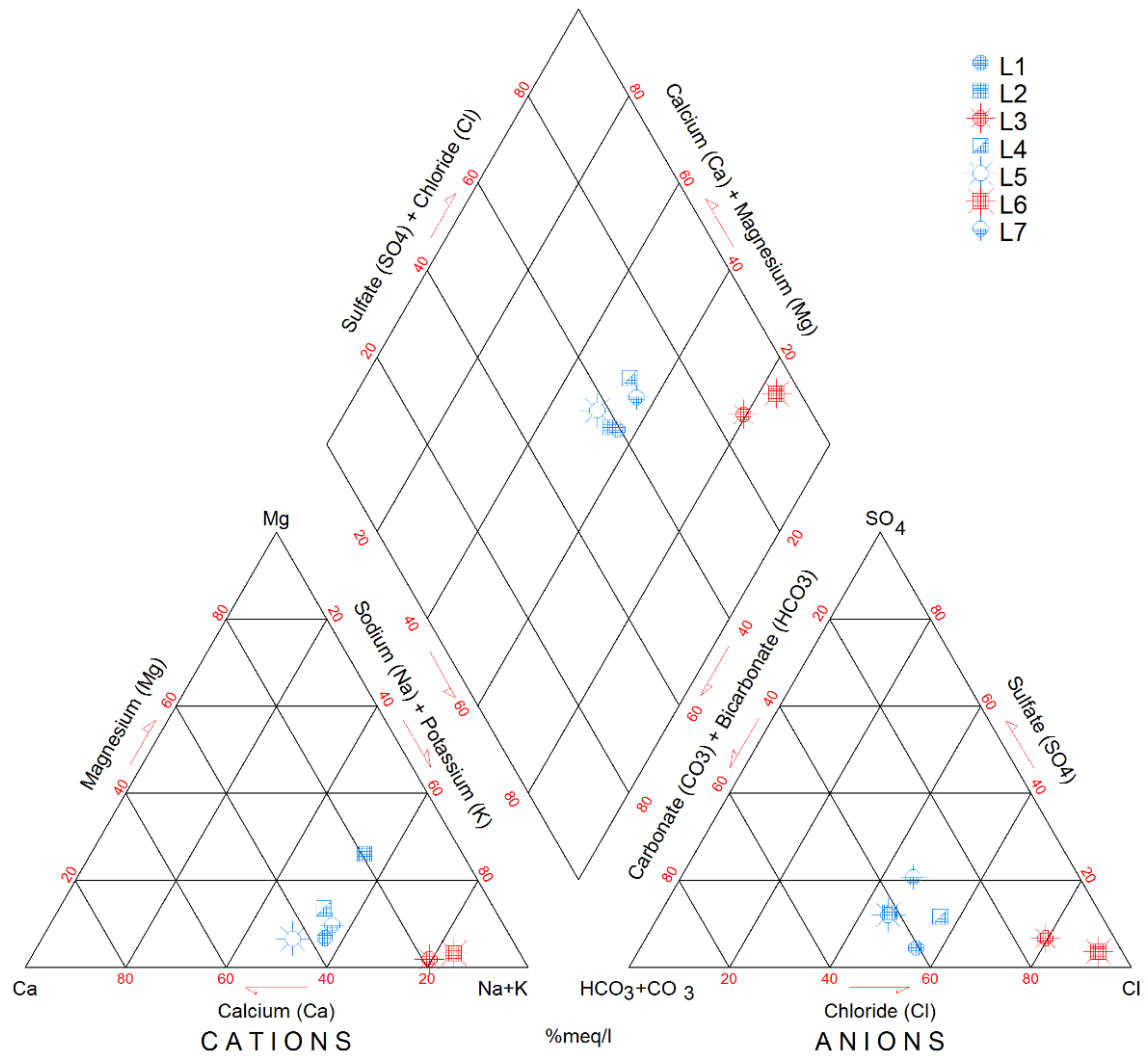


Figura 5.20 – Diagrama de Piper das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).

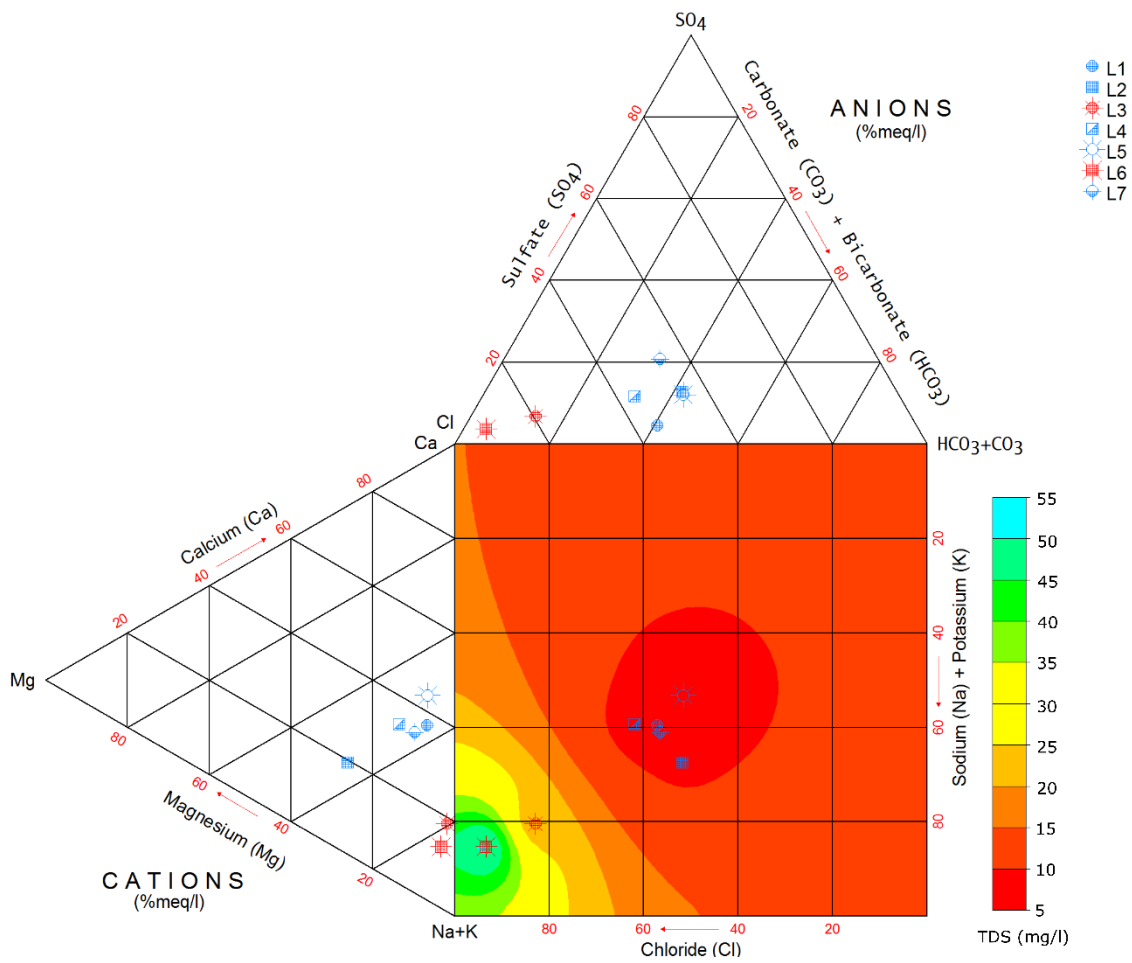


Figura 5.21 – Diagrama de Durov das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).

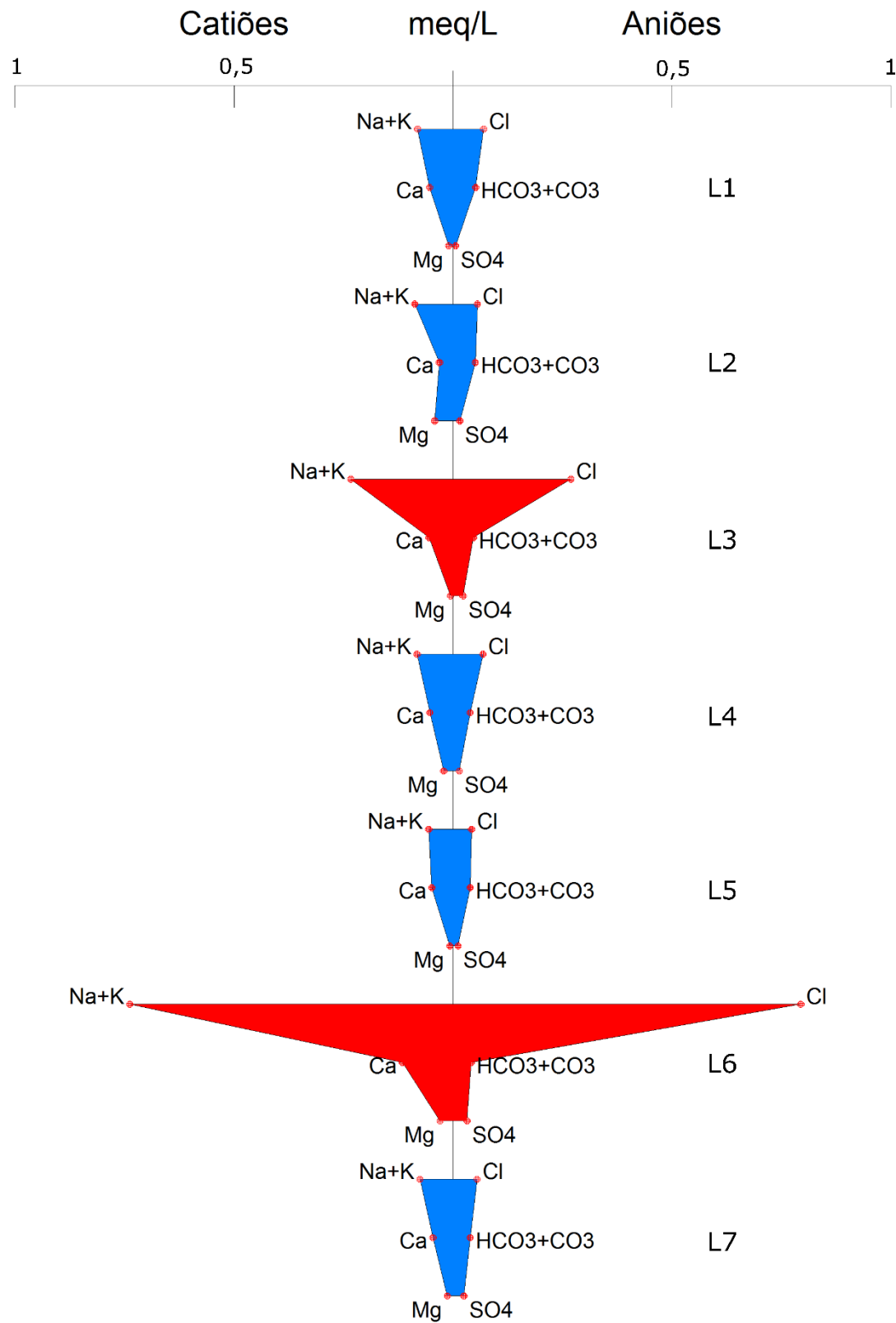


Figura 5.22 – Diagramas de Stiff das águas das lagoas da Serra da Estrela (L1 a L7).

Na Figura 5.23 é apresentado o mapa hidrogeoquímico, onde se visualiza a localização das lagoas e os respetivos diagramas de Stiff.

É visível a proximidade das lagoas em relação às rodovias e a influência destas na contaminação das lagoas. As lagoas mais próximas da estrada são a L3, L4 e L6. Com exceção para a lagoa L4, conclui-se que a limpeza da rodovia, no inverno, vai contaminar as lagoas mais próximas da estrada com os sais utilizados para promover o degelo.

De acordo com os resultados da hidrogeoquímica, as lagoas L3 e L6 são as que se encontram contaminadas, indicando que recebem influencia antrópica e, as lagoas L1, L2, L4, L5 e L7 não. Assim sendo, a hidrogeoquímica contribui para confirmar e apurar os modelos hidrológicos conceptuais, abordados no capítulo 4. Estes indicam que as lagoas não contaminadas se encontram isoladas (L1, L2, L4, L5 e L7), não tendo rede de drenagem superficial ou escoamento subterrâneo, que conduza até elas os sais do degelo. Relativamente à lagoa L6, o modelo permite verificar que a lagoa é alimentada por linhas de água que intersectam a estrada, entrando em contacto com os sais e acabando por contamina-la. Já a contaminação lagoa L3 corrobora a ideia de que a lagoa também é alimentada pelo escoamento subterrâneo, uma vez que a respetiva bacia hidrográfica, não intersecta a estrada.

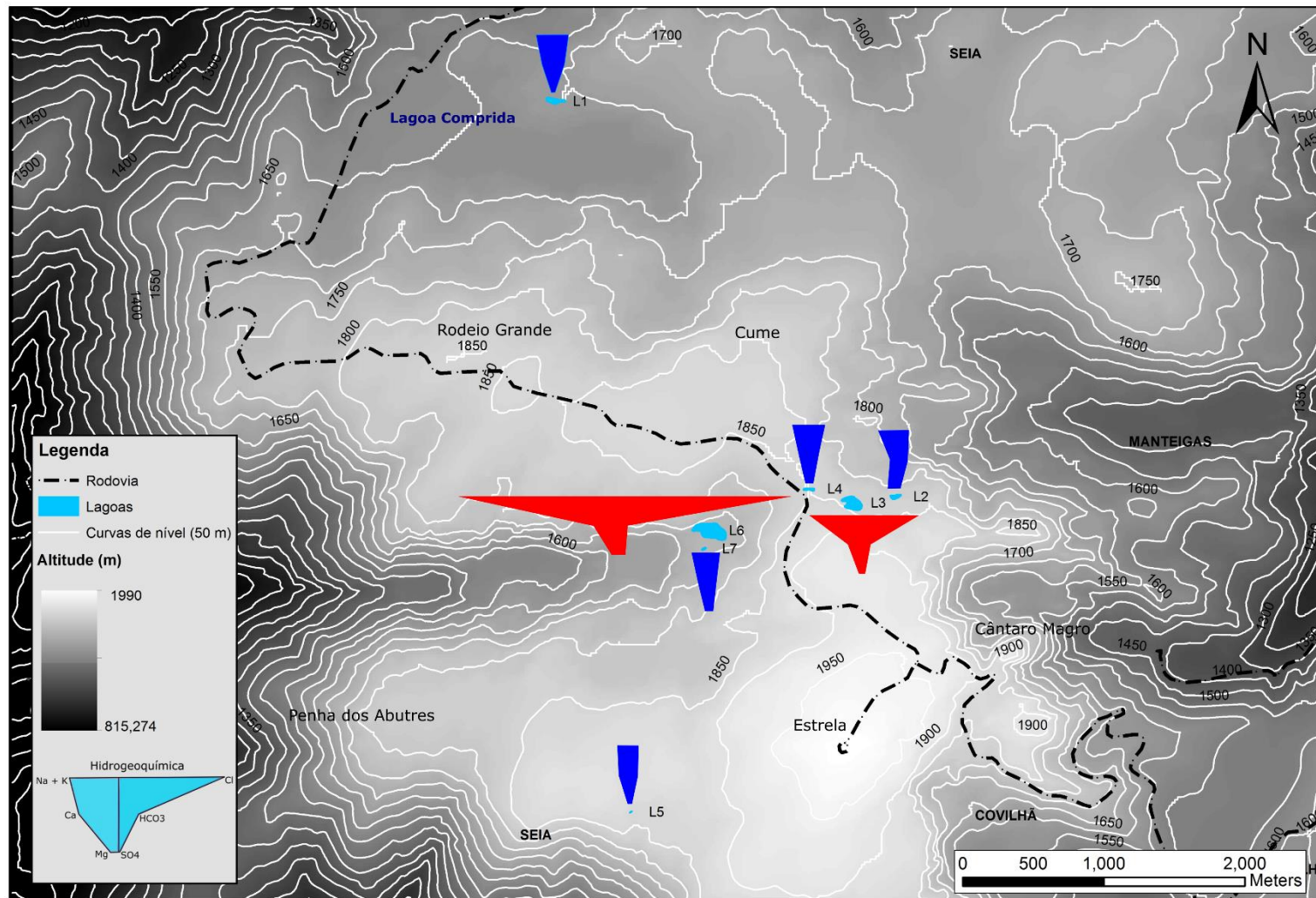


Figura 5.23 – Mapa hidrogeoquímico das lagoas estudadas na Serra da Estrela (base do modelo digital do terreno com malha de 25 m retirada de SNIAmb-APA 2016).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As regiões montanhosas apresentam-se como fonte de recursos hídricos de qualidade e em quantidade importante tanto para os ecossistemas como para a população em geral.

As lagoas das regiões montanhosas são sensíveis aos impactos antrópicos, tanto locais como globais.

Estas lagoas são afetadas, principalmente, pelas ameaças regionais, de tal forma que podem ser utilizadas como modelos para alterações globais e para os efeitos regionais dos ecossistemas de água doce.

Os dados morfológicos são igualmente importantes, pois a morfologia e a morfometria vão influenciar as propriedades físicas e químicas das lagoas.

Sendo a Serra da Estrela um reservatório natural de água doce de qualidade elevada e de grande importância socioeconómica, a realização de estudos hidrológicos é de grande pertinência. O presente estudo mostrou evidências da contaminação das lagoas e, conseqüentemente, dos recursos hídricos por NaCl e CaCl₂, utilizados na limpeza da neve das estradas.

Os resultados da análise da caracterização hidrológica das lagoas mostraram que, a lagoa situada a uma maior altitude é a L5 (1854 m) e a que se encontra a uma menor altitude é a L1 (1645 m). A lagoa que possui maior área é a L6 (19383 m²), possuindo também o maior comprimento máximo (258 m). A lagoa de menor área é a L5 (242 m²), que apresenta também o menor comprimento máximo (34,2 m). No geral, as lagoas apresentam uma forma elítica. Foi também possível definir três tipos de modelos hidrológicos conceptuais: lagoas sem rede de drenagem superficial, que se encontram acima da superfície freática e onde a infiltração é escassa; lagoas sem rede de drenagem superficial, mas em que a superfície freática está em contacto com o fundo da lagoa pelo menos parte do ano e lagoas com rede de drenagem superficial em que o fundo da lagoa se encontra abaixo da superfície freática.

O estudo hidrogeoquímico colocou em evidência a contaminação de duas lagoas – L3 e L6. Tanto os valores de condutividade elétrica, como dos iões maioritários apresentaram-se como sendo os mais elevados nestas duas lagoas. As lagoas L3 e L6 exibiram valores de condutividade elétrica entre 10 e 148 µS/cm, enquanto as lagoas não contaminadas (L1, L2, L4, L5 e L7) variaram entre 5 e 20 µS/cm. Relativamente aos valores dos iões Na⁺, Ca²⁺ e Cl⁻ verificamos que os maiores valores registados em lagoas contaminadas e não contaminadas é: para o primeiro ião, o valor mais elevado chega a 25,4 mg/L na lagoa contaminada L6 e apenas a 2,2 mg/L na lagoa não

contaminada L4; o valor do catião Ca^{2+} alcança 3,3 mg/L na lagoa L6 e 1,3 mg/L na lagoa não contaminada L4; por último para o anião Cl^- o valor mais elevado alcança 45,5 mg/L na lagoa contaminada L6 e 4,7 mg/L na lagoa não contaminada L4.

Também da análise do mapa hidrogeoquímico verificamos que tanto a lagoa L3 como a L6 são as que se encontram mais próximo da rodovia, estando as restantes lagoas em locais isolados, o que leva a confirmar que a contaminação através da aplicação do sal para a limpeza da neve da estrada é a causa para a contaminação das lagoas: na lagoa L6 através da rede de drenagem superficial e, na lagoa L3, por escoamento subterrâneo uma vez que as linhas de água que chegam à lagoa não intersectam a estrada.

Em forma de complemento ao estudo desenvolvido e de perspetivas futuras poder-se-ia:

- ampliar o número de lagoas a estudar;
- relacionar os resultados da hidrogeoquímica com os resultados da hidrologia isotópica;
- monitorizar continuamente a evolução da temperatura da água das lagoas durante, pelo menos, um ano hidrológico;
- relacionar as características morfométricas e hidrogeoquímicas das lagoas com as características biológicas (fauna e flora presentes).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade E.; Mora C.; Neves M. & Vieira G., 1992. Desportos de Inverno na Serra da Estrela. Contribuição para o estudo da sua viabilidade, *Finisterra*, Lisboa, 53-54:187-193 pp.;

Aureli A., 2002. What's a head in UNESCO's International Hydrological Programme (IHP VI 2002-2007). *Hydrogeology Journal*, 10:349-350 pp.;

Brandyopadhyay J., 1995. The Mountains and Uplands as Water-Towers for Humanity: Need for a New Perspective in the Context of the 21st Century Compulsions. International Academy of the Environment. Geneva;

Carreira P. M., Marques, J. M., Espinha Marques, J., Chaminé, H. I., Fonseca, P. E., Monteiro Santos, F., Moura, R. M. & Carvalho, J. M., 2011. Defining the dynamics of groundwater in Serra da Estrela Mountain area, central Portugal: an isotopic and hydrogeochemical approach. *Hydrogeology Journal*, 19:117-131 pp.;

Carvalho A., Espinha Marques J., Marques J. M., Carreira P. M., Moura R., Guerner Dias A., Chaminé H. I., Rocha F., Saraiva R., Tavares M. & Mansilha C., 2012. Contaminação de água subterrânea por substâncias de limpeza da neve em estradas: o caso de sector de Nave de Santo António – Covão do Curral (Serra da Estrela, Centro de Portugal). *Comunicações Geológicas LNEG-Laboratório Nacional de Geologia e Energia*, 99, 1: 19-25 pp.;

Carvalho J. M., 2006. Prospeção e pesquisa de recursos hídricos subterrâneos no Maciço Antigo Português: linhas metodológicas, 292 pp., anexos e carta hidrogeológica. Universidade de Aveiro. (Dissertação de doutoramento);

Carvalho J.M., Espinha Marques J., Afonso M.J. & Chaminé H.I., 2007. Prospeção e pesquisa de recursos hidrominerais e de água de nascente no Maciço Antigo Português. *Boletim de Minas*, Lisboa, 42, 161–196 pp.;

Cunha L. V., Gonçalves A. S., Alves de Figueiredo V. & Lino M., 1980. A Gestão da água, Princípios Fundamentais e a sua aplicação em Portugal. 697 pp., Fundação Calouste Gulbenkian, Porto;

Custodio E. & Llamas M.R., 1996. Hidrologia subterrânea, 2 Vols, 2350 pp. Omega, Barcelona;

Custodio E. & Llamas M.R., 2001. Hidrologia subterrânea, 2ª Ed., 2 Vols, 2350 pp. Omega, Barcelona;

- Daveau S., 1969. Structure et relief de la Serra da Estrela. *Finisterra*, 4 (7-8):33-197 pp.;
- Daveau S., Ferreira N. & Vieira G., 1997. Novas observações sobre a glaciação da Serra da Estrela, *Estudos do Quaternário*, Lisboa, 1: 41 -51 pp.;
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2002. Managing highway deicing to prevent contamination of drinking water. *Source Water Protection Practices Bulletin*. EPA 816-F-02-019;
- Espinha Marques J, Marques J. M., Carreira P. M., Fonseca P. E., Monteiro Santos F. A., Moura R., Samper J., Pisani B., Teixeira J., Carvalho J. M., Rocha F. & Borges F. S., 2013. Conceptualizing a mountain hydrogeologic system by using an integrated groundwater assessment (Serra da Estrela, Central Portugal): a review. *Geosciences Journal*, 17 (3):371-386 pp.;
- Espinha Marques J. M., 2007. Contribuição para o Conhecimento da Hidrogeologia da Região do Parque Natural da Serra da Estrela (Sector de Manteigas – Nave de Santo António – Torre). Universidade do Porto, Faculdade de Ciências (Tese de Doutoramento) 466 pp.;
- Espinha Marques J. M., 2010. Hidrogeologia da região da Serra da Estrela (setor de Manteigas – Nave de Santo António – Torre): uma abordagem multidisciplinar. in: J. M. Cotelos Neiva, A. Ribeiro, M. Victor, F. Noronha, M. Ramalho (Eds). *Ciências Geológicas- Ensino e Investigação e a sua História*. Vol.II, Capítulo II-Geologia e Ambiente. Publicação Comemorativa do ‘Ano Internacional do Planeta Terra’. Associação Portuguesa de Geólogos. Sociedade Geológica de Portugal, 239-247 pp.;
- Espinha Marques J., Carvalho A., Marques J. M., Chaminé H. I., Guerner A., Moura R., Carreira P., Neves O., Samper J. & Rocha F., 2011a. Methodology for assessing the impact of the use of road salt on groundwater resources in a mountain environment (Serra da Estrela, Central Portugal). *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 36:79-98 pp.;
- Espinha Marques J., Duarte J. M., Constantino A. T., Aguiar C., Rocha F. T., Marques J. M., Samper J., Borges F. S., Carvalho J. M. & Chaminé H. I., 2009a. Avaliação *in situ* da condutividade hidráulica de solos de montanha: um caso de estudo na Serra da Estrela (Centro de Portugal). *Cad. Lab. Xeol. Laxe*, A Coruña, 34:143-164 pp.;
- Espinha Marques J., Marques J. M. & Aguiar C., 2009b. A groundwater system in a mountain environment (Serra da Estrela, Portugal). In: Evelpidou N., Figueiredo T., Mauro F., Vahap A. & Vassilopoulos A. (Eds). *Natural Heritage in Europe from East to West*. Springer-Verlag, 163-167 pp.;

Espinha Marques J., Marques J. M., Carvalho J. M., Samper J., Carreira P. M., Fonseca P. E., Santos F. M., Chaminé H., Almeida P. G., Moura R. M., Borges F. S. & Pinto de Jesus A., 2008. Modelação conceptual em Hidrogeologia: um caso de estudo no Parque Natural da Serra da Estrela, nº21, Associação Portuguesa de Geólogos. *Geonovas*, 41 - 51 pp.;

Espinha Marques J., Marques J. M., Chaminé H. I., Afonso M. J., Carreira P. M., Fonseca P. E., Cabral J., Monteiro Santos F. A., Vieira G. T., Mora C., Gomes A., Teixeira J., Samper J., Pisani B. J., Aguiar C., Gonçalves J. A., Almeida P. G., Cavaleiro V., Martins Carvalho J., Sodré Borges F., Aires-Barros L. & Rocha F. T., 2005. Hydrogeological study of a high mountain area (Serra da Estrela, Central Portugal): a multidisciplinary approach. *Cad. Lab. Xeol. Laxe, A Coru a*, 30:145-166 pp.;

Espinha Marques J., Samper J., Pisani B., Alvares D., Carvalho J. M., Chaminé H. I., Marques J.M., Vieira G. T., Mora C. & Borges F. S., 2011b. Evaluation of water resources in a high-mountain basin in Serra da Estrela, Central Portugal, using a semi-distributed hydrological model. *Environmental Earth Sciences*, 62:1219-1234 pp.;

Espinha Marques J., Samper J., Pisani, B. V., Alvares D., Vieira G. T., Mora C., Martins Carvalho J., Chaminé H. I., Marques J. M. & Sodré Borges F., 2006. Avaliação de recursos hídricos através de modelação hidrológica: aplicação do programa Visual Balan v2.0 a uma bacia hidrográfica na Serra da Estrela (Centro de Portugal). *Cad. Lab. Xeol. Laxe, A Coru a*, 31: 43-65 pp.;

Ferreira N. & Vieira G., 1999. Guia geológico e geomorfológico do Parque Natural da Serra da Estrela. Locais de interesse geológico e geomorfológico, 112 pp.; 1 mapa. Parque Natural da Serra da Estrela. Edição Instituto da Conservação da Natureza/Instituto Geológico e Mineiro, Lisboa;

Fetter C. W., 2001. Applied Hydrogeology. 4th Ed., 598 pp. Prentice Hall, New Jersey;

Florida Lakewatch, 2001. A Beginner's Guide to Water Management – Lake Morphometry Information Circular 104. 2nd Ed., 32 pp. University of Florida, Florida;

Forster C.B. & Smith L., 1988. Groundwater flow systems in mountainous terrain-Controlling factors. *Water Resources*, 2:1011–1023 pp.;

Freeze R. A. & Cherry J. A.; 1979. Groundwater, 604 pp. Presentice Hall, Inc. New Jersey;

- Grunewald K., Scheithauer J., Monget J. M. & Nikolova N. N., 2007. Mountain water tower and ecological risk estimation of the Mesta-Nestos transboundary river basin (BulgariaGreece). *Journal of Mountain Science*, 4 (3):209-220 pp.;
- Hoffman R. L., Tyler T. J., Larson G. L., Adams M. J., Wentz W. & Galvan S., 2005. Sampling protocol for monitoring abiotic and biotic characteristics of mountain ponds and lakes: Techniques and Methods 2-A2. 90 pp. U. S. Geological Survey, Virginia;
- Hutchinson G. E., 1957. A Treatise on Limnology. Vol.1- Geography, Physics, and Chemistry, 1015 pp. John Wiley & Sons Inc., New York;
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. & Rubel F., 2006. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263 pp.;
- Lautensach H., 1932. Estudo dos glaciares da Serra da Estrela. *Memórias e Notícias*. Coimbra, 6:1-60 pp. (trad. Lautensach, 1929);
- Mora C. & Vieira G. T., 2004. Balance radioactivo de los altiplanos de la Sierra de Estrella (Portugal) en una mañana de invierno. Metodología y primeros resultados. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Natur., Sec. Geol.*, 99, 1 -4:37-45 pp.;
- Mora C., 2006. Climas da Serra da Estrela, características regionais e particularidades locais dos Planaltos e do Ato Vale do Zêzere, 427 pp., Universidade de Lisboa (Dissertação de Doutoramento em Geografia, área de especialização em Geografia Física);
- NAP [National Academy Press], 2001. Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone, 374 pp., Washington, D.C.;
- Oliveira J. T., Pereira E., Ramalho M., Antunes M. T. & Monteiro J. H., Coords, 1992. Carta Geológica de Portugal à escala 1/500 000. 5ª Ed., 2 folhas. Serviços Geológicos de Portugal. Lisboa;
- Peel M.C., Finlayson B.L. & McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644 pp.;
- Ribeiro A., Kullberg M. C., Kullberg J. C., Manuppella G. & Phipps S., 1990. A review of Alpine tectonics in Portugal: Foreland detachment in basement and cover rocks. *Tectonophysics*, 184 (3/4): 357-366 pp.;
- Ribeiro O., 1954. Estrutura e relevo da Serra da Estrela. *Bol. real. Soc. Esp. Hist. Natur.*, Madrid. Tomo de Homenaje a E.Hernández-Pacheco, 549-566 pp.;
- Ribeiro, A., 1988. A Tectónica Alpina em Portugal. *Geonovas*. Lisboa, 10: 8-11 pp.;

Teixeira C., Brito de Carvalho L. H., Paula Santos J., Martins Peres A., Barros R. F., Pilar L., Fernandes A. P. & Rocha A. T., 1967. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000;

Teixeira C., Santos J. Paula, Carvalho H. F., Fernandes A. P. & Vairinho M. M, 1974. Carta Geológica de Portugal na escala de 1/50 000. Notícia Explicativa da folha 20-B – Covilhã. 52 pp. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa;

Tiberti R., Tartari G. A. & Marchetto A., 2010. Geomorphology and hydrochemistry of 12 Alpine lakes in the Gran Paradiso National Park. Italy. *Journal of Limnology*, 69 (2):242-256 pp.;

Torres E., 2015. Análise morfológica de lagoas naturais da Serra da Estrela, 55 pp., Universidade do Porto, Faculdade de Ciências (relatório de estágio de licenciatura);

Vieira G. T. & Mora C., 1998. General characteristics of the climate of the Serra da Estrela, In: G. T. Vieira, Ed., Glacial and Periglacial Geomorphology of the Serra da Estrela. Guidebook for the field-trip, IGU Commission on Climate Change and Periglacial Environments, 26 August 1998, 26-36 pp., CEG and Department of Geography, University of Lisbon;

Vieira G. T., 2004. Geomorfologia dos planaltos e altos vales da Serra da Estrela, Ambientes frios do Plistocénico Superior e dinâmica atual, 724 pp., 1 mapa, Universidade de Lisboa (Dissertação de Doutoramento em Geografia, área de especialização em Geografia Física);

Vieira G., 2008. Combined numerical and geomorphological reconstruction of the Serra da Estrela plateau icefield, Portugal. *Elsevier, Geomorphology* 97 (2008): 190-207 pp.;

Viviroli D., Archer D.R., Buytaert W., Fowler H. J., Greenwood G. B., Hamlet A. F., Huang Y., Koboltschnig G., Litaor M. I., López-Moreno J. I., Lorentz S., Schädler B., Schwaiger K., Vuille M. & Woods R., 2010. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and politics. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 7:2829-2895 pp.;

Welch P. S., 1948. Limnological Methods. 381 pp. McGraw-Hill Book Company Inc., United States of America;

Welch P. S., 1952. Limnology. 2nd Ed., 538 pp. McGraw-Hill Book Company Inc., United States of America;

Wetzel R. G., 1993. Limnologia. 2nd Ed., 919 pp. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

PÁGINAS DA INTERNET

Difference Between Similar Terms and Objects [Difference Between] – Difference Between Lake and Pond. <http://www.differencebetween.net/miscellaneous/geography-miscellaneous/difference-between-pond-and-lake/> (consultado em 12/02/2016);

Lake Morphometry. http://oregonstate.edu/instruct/fw456/lecture/pdf/lake_morphometry.pdf (consultado em 16/12/2015);

Maine Department Environmental Protection [Maine] – Lake or Pond. <http://www.maine.gov/dep/water/lakes/lkepond.html> (consultado em 12/02/2016);

Mental_floss [Mentalfloss] – What's the difference between a lake or a pond. <http://mentalfloss.com/article/57902/whats-difference-between-lake-and-pond> (consultado em 12/02/2016);

Sistema Nacional de Informação de Ambiente-Agência Portuguesa do Ambiente [SNI Amb-APA] – Modelo Digital de Escoamento 25x25 (Geocodificação). <http://sniamb.apambiente.pt/geoportal/catalog/search/resource/details.page?uuid=%7B6A779C28-147C-4205-BCA0-EF9983E16AFD%7D> (consultado em 29/07/2016);



Soil & Water Conservation Society of Metro Halifax [SWCSMH] – Lake morphology. <http://lakes.chebucto.org/DATA/morphology.html> (consultado em 16/12/2015).

ANEXOS



ANEXO I

INVENTÁRIO DE PONTOS DE ÁGUA



Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L1	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 21' 48.9" N 7° 38' 14.3" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1645	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 4,9	(7) <u>pH:</u> 5,06	(8) <u>Condutividade Elétrica (µS/cm):</u> 9,56
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m 1-2 m X > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito de Seia – granito de duas micas, porfiróide de grão grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale Planalto X Encosta Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 130	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 35	(18) <u>Área – A (m²):</u> 3463
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (3463/130) 26,64		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 324
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (324/2√(π3463)) 1,55 (Lagoa de forma elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 



Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L2	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 20' 17.2" N 7° 36' 27.5" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1822	(5) <u>Data:</u> 27 / Janeiro / 2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 3,9	(7) <u>pH:</u> 5,18	(8) <u>Condutividade Elétrica (µS/cm):</u> 7,30
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m 1-2 m > 2 m X
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico, de grão médio a grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale Planalto Encosta X Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 76,9	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 40	(18) <u>Área – A (m²):</u> 2016
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (2016/76,9) 26,22		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 211
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (211/2√(π2016)) 1,33 (Lagoa de forma subcircular a elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 

Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L3	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 20' 14.9" N 7° 36' 40.2" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1834	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 4,9	(7) <u>pH:</u> 5,17	(8) <u>Condutividade Elétrica (μS/cm):</u> 55,60
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m X 1-2 m > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente Semi-permanente X Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico, de grão médio a grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale X (Fundo de Vale) Planalto Encosta Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 167	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 125	(18) <u>Área – A (m²):</u> 11781
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (11781/167) 70,54		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 694
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (694/2√(π11781)) 1,80 (Lagoa de forma elítica a alongada)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> 180.000		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 



Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L4	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 20' 21.1" N 7° 36' 54.3" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1849	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 4,2	(7) <u>pH:</u> 4,66	(8) <u>Condutividade Elétrica (μS/cm):</u> 13,93
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m 1-2 m X > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico de grão médio a grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale Planalto Encosta Portela X	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 51,5	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 33,8	(18) <u>Área – A (m²):</u> 859
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (859/51,5) 16,68		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 169
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (169/2√(π859)) 1,63 (Lagoa de forma elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 


Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L5	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 19' 2.2" N 7° 37' 47.1" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1854	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 4,2	(7) <u>pH:</u> 5,18	(8) <u>Condutividade Elétrica (µS/cm):</u> 7,47
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m X 1-2 m > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico, de grão médio a grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale X (Fundo de Vale) Planalto X Encosta Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 34,2	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 11,8	(18) <u>Área – A (m²):</u> 242
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (242/34,2) 7,08		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 123
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (123/2√(π242)) 2,23 (Lagoa de forma alongada)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 

Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L6	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 20' 8.8" N 7° 37' 25.6" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1734	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 3,6	(7) <u>pH:</u> 5,42	(8) <u>Condutividade Elétrica (μS/cm):</u> 91,10
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m X 1-2 m > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico, de grão médio a grosseiro e Granito da Covilhã – granito de duas micas, porfiróide de grão médio	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale X (Fundo de Vale) Planalto Encosta Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 258	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 115	(18) <u>Área – A (m²):</u> 19383
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (19383/258) 75,13		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 782
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (782/2√(π19383)) 1,58 (Lagoa de forma elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> 1.240.000		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 

Inventário de pontos de água

Localização da Lagoa		
(1) <u>Identificação:</u> L7	(2) <u>Carta Topográfica:</u> 223-Loriga (Seia) à escala 1/25 000 <u>Carta Geológica:</u> Carta Geológica Simplificada do Parque Natural da Serra da Estrela à escala 1/75 000	
(3) <u>Coordenadas Geográficas:</u> 40° 20' 4.5" N 7° 37' 25.7" W	(4) <u>Altitude (m):</u> 1749	(5) <u>Data:</u> 27 /Janeiro /2016
Propriedades da Lagoa		
(6) <u>Temperatura (°C):</u> 2,2	(7) <u>pH:</u> 4,94	(8) <u>Condutividade Elétrica (μS/cm):</u> 7,46
(9) <u>Cor:</u> Incolor	(10) <u>Turbidez:</u> Límpida	(11) <u>Profundidade máxima Z_m:</u> < 1 m 1-2 m X > 2 m
(12) <u>Permanência:</u> Permanente X Semi-permanente Temporária	(13) <u>Litologia da bacia hidrogeológica:</u> Granito da Estrela – granito moscovítico, de grão médio a grosseiro	
(14) <u>Geomorfologia:</u> Vale Planalto Encosta X (Depressão cavada na rocha) Portela	(15) <u>Vegetação dominante:</u> Árvores Arbustos Ervas Gramíneas	
(16) <u>Comprimento – l (m):</u> 62,8	(17) <u>Largura – b_x (m):</u> 25	(18) <u>Área – A (m²):</u> 903
(19) <u>Largura média – b (m):</u> (Área/Comprimento) (903/62,8) 14,38		(20) <u>Perímetro – L (m):</u> 155
(21) <u>Desenvolvimento da linha de costa – D_L:</u> (L/2√(πA)) (155/2√(π903)) 1,46 (Lagoa de forma elítica)		
(22) <u>Área da bacia hidrográfica (m²):</u> Não apresenta bacia hidrográfica ou está associada à bacia hidrográfica de L6		
<u>Registo fotográfico</u> 		<u>Localização na Carta Topográfica</u> 